



Jair António Marques de Pina

Licenciado em Engenharia dos Materiais

Optimização de Células Fotovoltaicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Microelectrónica e Nanotecnologias

Orientador: Prof. Doutora Isabel Ferreira (FCT/UNL)
Co-orientador: Prof. José Lima de Oliveira (ISEL)

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Carlos Jorge Mariano Miranda Dias
Arguente: Prof. Doutor Hugo Manuel Brito Águas
Vogal: Prof. Doutor Isabel Maria das Mercês Ferreira
Vogal: Prof. José Manuel Lima de Oliveira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2013

“Copyright” **Jair António Marques de Pina, FCT e UNL.**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Aproveito esta oportunidade para agradecer à minha orientadora, à Prof. Doutora Isabel Ferreira pela amizade, apoio, profissionalismo, compreensão e pela paciência demonstrada nos momentos mais difíceis, que me ajudaram a ultrapassar os vários obstáculos durante a realização deste trabalho. Agradeço pelos conselhos técnicos, ideias e pela cedência do laboratório de Microelectrónica e Nanotecnologias do DCM e dos instrumentos necessários para a realização das experiências.

Agradeço ao meu co-orientador o Engenheiro Lima de Oliveira pela aposta em mim neste projecto, pela amizade, simplicidade e partilha de conhecimentos essenciais para a conclusão desta dissertação.

Quero deixar um agradecimento a todo o grupo do Laboratório de Máquinas Eléctricas do ISEL que me acolheram e sempre me apoiaram desde o início deste projecto. Um especial agradecimento ao Sr. Carlos, Paulo, Ricardo, Nuno e Celso pela disponibilidade, amizade, apoio e conselhos fundamentais para a realização da instalação PV.

Quero deixar os meus votos de agradecimento ao Eli e ao Ricardo da secção electrónica do CEMOP pelo apoio na construção da montagem para os ensaios das células fotovoltaicas.

A todos os meus amigos e colegas da Licenciatura e do Mestrado, por todos esses anos de amizade, companheirismo e lealdade, em especial um agradecimento ao Mário, Igor, Andreia, Lara, Diana, Raquel, Rafael, Kevin, César, Joaquim, Jorge.

Um especial agradecimento à minha namorada, companheira e amiga Maura, pelos momentos juntos passados, pelo carinho, apoio e força que sem eles não seria possível passar esta etapa da minha vida.

À minha família pelo apoio, colaboração, incentivo, paciência e compreensão, em especial à minha avó, aos melhores irmãos do mundo Helder e Harry, e aos meus pais, Manuel António de Pina e Maria Helena Marques dos Reis, pelo sacrifício enorme que fizeram e que sem o suporte deles nada disto seria possível.

A todos, um muito OBRIGADO por tudo.

Resumo

Perante os cenários do aumento da população mundial, da concentração de CO₂, dos custos dos combustíveis, do consumo energético mundial e das alterações climáticas, surgiu a necessidade de encontrar fontes de energias alternativas. Neste contexto, a Energia Solar Fotovoltaica, fruto de investigações e investimentos realizados, teve um grande impacto na última década, registando um aumento significativo quer da produção de painéis fotovoltaicos ou de instalações de sistemas fotovoltaicos no Mundo. A Energia solar Fotovoltaica surge como uma energia alternativa limpa, inesgotável e que contribui para a diminuição do impacto ambiental, mas o elevado custo inicial é ainda um entrave à sua comercialização, sendo por isso importante conseguir uma optimização na produção dos painéis fotovoltaico bem como em instalações a fim de otimizar o seu rendimento.

Um dos objectivos deste trabalho foi instalar e monitorizar um sistema fotovoltaico no telhado do laboratório de máquinas eléctricas do ISEL. Foi instalado um sistema com uma potência de 990 *Watts*. A monitorização dos módulos durante alguns períodos de 2011 e 2012 demonstraram um bom desempenho do sistema fotovoltaico instalado comparativamente aos valores estimados.

Outro objectivo deste trabalho foi estudar a influência da temperatura no rendimento das células fotovoltaicas. A primeira fase deste estudo foi desenvolver um modelo matemático de uma célula fotovoltaica em Simulink/Matlab. As curvas obtidas da simulação numérica do modelo matemático permitiram observar e demonstrar a influência do aumento da temperatura das células fotovoltaicas na sua potência e rendimento. A segunda fase deste estudo tinha como objectivo comprovar experimentalmente o efeito da temperatura e analisar possíveis meios que permitissem refrigerar as células fotovoltaicas. Através de uma montagem experimental específica as células fotovoltaicas foram testadas num ambiente controlado. Os valores obtidos permitiram observar uma diminuição de cerca de 36% da temperatura das células utilizando refrigeração e consequente aumento do rendimento.

Palavras-chave: Energia solar, Célula fotovoltaica, Painéis Fotovoltaicos, sistemas fotovoltaicos.

Abstract

Facing the sceneries of the increase of the world-wide population, of the concentration of CO₂, of costs of the fuels, of the energetic world-wide consumption and of the climatic alterations, there appeared the necessity of finding alternative energy sources. In this context, the research and investment in Solar Photovoltaic Energy, have had a great impact in the last decade, registering a significant increase in both the production of photovoltaic panels or of photovoltaic system installations in the World. Solar photovoltaic energy emerges as a clean alternative energy, inexhaustible and that contributes to the reduction of environmental impact, but the high initial cost is still an obstacle to its marketing, it is therefore important to optimize the production of photovoltaic panels as well as photovoltaic installations to enhance its performance.

One of the aims of this work was to install and monitor a photovoltaic system on the roof of the laboratory of electrical machinery of ISEL. It was installed a system with a power of 990 Watts. The monitoring of the modules during some periods of 2011 and 2012 showed a good performance of the installed photovoltaic system compared with the estimated values.

Another aim of this thesis was to study the influence of temperature on the efficiency of photovoltaic cells. The first phase of this study was to develop a mathematical model of a photovoltaic cell in Simulink/Matlab. The curves obtained from numerical simulation of the mathematical model allow to observe the influence of the temperature increase of photovoltaic cells in its power and performance. The second phase of this study had as objective demonstrate experimentally the effect of temperature and examine possible ways which make it possible to cool the photovoltaic cells. Through an experimental assembly specifies the photovoltaic cells were tested in a controlled environment. The values obtained allowed us to note a decrease of about 36 °C of the temperature of the cells using one of the means of cooling and the consequent increase of the efficiency.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic Cell, Photovoltaic Panels, photovoltaic systems

Índice Geral

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objectivos	1
1.3	Estrutura e organização da dissertação	2
2	Célula Fotovoltaica	3
2.1	Breve estado da arte do efeito fotovoltaico	3
2.2	Evolução da Produção e Instalação PV na última década	8
2.3	Descrição da célula solar fotovoltaica	12
2.3.1	Semicondutores	12
2.3.2	Estrutura da Célula PV	13
2.3.3	Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica	13
2.3.4	Tecnologia PV	15
3	Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica	17
3.1	Modelo teórico simplificado da célula fotovoltaica.....	17
3.1.1	Estudo dos pontos de funcionamento das células PV.....	19
3.1.2	Potência eléctrica.....	20
3.1.3	Rendimento eléctrico e Factor de forma.....	21
3.1.4	Cálculo e desenvolvimento do modelo teórico simplificado.....	22
3.1.5	Variação da corrente de curto-circuito (<i>I_{sc}</i>).....	24
3.1.6	Corrente de saturação <i>I₀</i>	24
3.2	Modelo simplificado real	25
3.3	Modelo de dois díodos	26
3.4	Modelação em Simulink	26
3.4.1	Modelo simplificado em Simulink/Matlab.....	27
3.4.2	Modelo simplificado da célula real	30
3.4.3	Modelo de dois díodos.....	33
3.4.4	Comparação dos modelos desenvolvidos em Simulink	34
3.5	Modificação do modelo matemático da célula Fotovoltaica para estudar a influência da temperatura no comportamento da célula Fotovoltaica.....	35
3.5.1	Radiação incidente.....	38
4	Otimização de Células Fotovoltaicas	41
4.1	Descrição da Montagem Experimental	41
4.1.1	A Célula solar	42

4.1.2	Sistemas de aquisição de dados	43
4.2	Exposição das células PV à radiação dos projectores.....	44
4.2.1	Temperatura ambiente, distância e humidade relativa	45
4.2.2	Emissividade.....	45
4.2.3	Temperatura reflectida.....	46
4.2.4	Obtenção dos valores corrente e tensão nas células	47
4.2.5	Potência das células	48
4.2.6	Efeito da temperatura e da radiação incidente nas células	48
4.2.7	Obtenção dos valores da temperatura das células	49
4.3	Refrigeração das células por ventilação.....	51
4.3.1	Obtenção dos valores da corrente e tensão nas células	52
4.3.2	Variação da potência das células refrigeradas com ventilação.....	52
4.4	Arrefecimento do sistema utilizando água como líquido refrigerador	54
4.4.1	Obtenção dos valores da corrente e da tensão	54
4.4.2	Potência das células	56
4.5	Discussão de Resultados	57
4.5.1	Temperatura das células	57
4.5.2	Potência e o aquecimento das células FV	58
4.5.3	Rendimento eléctrico das células fotovoltaicas	59
5	Montagem e Instalação de Painéis Fotovoltaicos	63
5.1	Localização e a instalação.....	63
5.1.1	Painéis fotovoltaicos.....	64
5.1.2	Tipo de estrutura de fixação	65
5.1.3	Orientação dos painéis fotovoltaicos.....	65
5.1.4	Sombreamentos	66
5.1.5	O Inversor	69
5.1.6	Rendimento do inversor	70
5.2	Monitorização dos Módulos Fotovoltaicos.....	71
5.2.1	Estimativa da Energia Produzida.....	71
5.2.2	Energia Produzida.....	72
6	Conclusão e perspectivas futuras	75
6.1	Perspectivas futuras de desenvolvimento	77
6.2	Considerações Finais	77
7	Bibliografia.....	79
8	Anexos.....	83

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros de uma célula PV do módulo BP585U (STC)	27
Tabela 3.2 - Resultados obtidos através dos diferentes modelos	34
Tabela 4.1 - Valores da simulação da célula	43
Tabela 4.2 - Parâmetros da câmara térmica.....	45
Tabela 4.3 - Especificação técnica do cooler	51
Tabela 4.4 - Valores máximos e mínimos da corrente e da tensão	55
Tabela 4.5 - Resumo dos valores da temperatura das células e da água	58
Tabela 4.6 – Análise da Potência das células	59
Tabela 4.7 - Rendimento eléctrico das células	60
Tabela 4.8 - Influência do Cooler.....	61
Tabela 5.1 - Especificação técnica do módulo solar SM110.....	64
Tabela 5.2 – Total de energia eléctrica produzida.....	74
Tabela B. 1 – Dados da energia captada dos módulos em 2011	87
Tabela B. 2 - Total de energia captada mensalmente – 2011	88
Tabela B. 3 - Dados da energia captada dos módulos em 2012	89
Tabela C. 1 - Simulação da célula solar (SPI-Sum Simulator 240A).....	91
Tabela C. 2 - Valores I, V, P - Sem arrefecimento.....	93
Tabela C. 3 - Temperatura das células	96
Tabela C. 4 - Valores I, V, P – Arrefecimento com água.....	98
Tabela C. 5 - Temperatura das células	101
Tabela C. 6 - Temperatura da água	103
Tabela C. 7 - Valores I, V, P dos ensaios realizados com o cooler	106
Tabela C. 8 - Temperatura das células	109

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Experiência realizada por Becquerel	3
Figura 2.2 - Produção PV Mundial.....	9
Figura 2.3 – Evolução da Instalação PV anual (MW) (2000-2009).....	9
Figura 2.4 - Evolução da Produção PV Mundial (2000-2010).....	10
Figura 2.5 - Evolução da instalação PV 2000-2011 (MW)	11
Figura 2.6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica referência	13
Figura 2.7 - Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica.....	14
Figura 2.8 – Tecnologias das células PV	15
Figura 3.1 - Circuito eléctrico equivalente de uma célula PV	17
Figura 3.2 - Curva característica típica de uma célula solar PV.....	19
Figura 3.3 - Curva característica típica Potência-Tensão de uma célula PV	20
Figura 3.4 - Circuito eléctrico equivalente da célula PV, modelo real.....	25
Figura 3.5 - Circuito eléctrico equivalente da célula PV, modelo de dois díodos.....	26
Figura 3.6 – Diagrama de blocos do modelo simplificado	27
Figura 3.7 - Curva I-V da célula PV- Modelo simplificado	28
Figura 3.8 - Curva da Potência	29
Figura 3.9 - Diagrama de blocos do modelo simplificado - I_{\max} e V_{\max}	29
Figura 3.10 - Curva característica com influência da resistência	31
Figura 3.11 - Curva característica com influência da resistência R_s	31
Figura 3.12 - Diagrama de blocos para o modelo simplificado da célula real	32
Figura 3.13 - Curvas I-V e P-V obtidas através do modelo da célula real	33
Figura 3.14 - Diagrama de blocos para o modelo de dois díodos	33
Figura 3.15 - Curva I-V e PV dos três modelos	35

Figura 3.16 - Modelo modificado com influência da temperatura	36
Figura 3.17 - Curva I-V em função da temperatura da célula	37
Figura 3.18 - Influência da temperatura na Curva P-V	38
Figura 3.19 - Influência da radiação solar na curva I-V da célula solar.....	39
Figura 4.1 – Montagem experimental	41
Figura 4.2 - Curva característica da célula solar utilizada.....	42
Figura 4.3- Células fotovoltaicas no suporte	44
Figura 4.4 - Curvas dos valores da corrente e da tensão	47
Figura 4.5 - Gráfico da potência ao longo do tempo de exposição	48
Figura 4.6 – Variação da temperatura das células quando expostas à radiação	49
Figura 4.7- Variação da potência com a temperatura das células	50
Figura 4.8 - Variação da potência e da temperatura ao longo do tempo	50
Figura 4.9 - Suporte com o cooler	51
Figura 4.10 - Gráfico dos valores da corrente e da tensão nas células	52
Figura 4.11 - Gráfico da potência em função do tempo: célula ventilada.....	53
Figura 4.12 - Fotografia do sistema de refrigeração realizado: serpentina de cobre.....	54
Figura 4.13 - Valores da tensão e corrente das células.....	55
Figura 4.14 - Evolução da potência com o aumento da temperatura das células.....	56
Figura 4.15 - Evolução da temperatura	57
Figura 4.16 - Evolução da potência em função da temperatura das células.....	58
Figura 4.17 - Rendimento eléctrico das células.....	60
Figura 5.1 – Estrutura do <i>string</i> constituído por três módulos solar SM110	63
Figura 5.2 – Fotografia dos painéis instalados realçando o espaçamento entre <i>strings</i> .	67
Figura 5.3 - Díodos de bloqueio e by-pass numa string	68
Figura 5.4 - Fusíveis de protecção do sistema PV instalado	69

Figura 5.5 - Esquema de um sistema fotovoltaico ligado a uma rede eléctrica	70
Figura 5.6 - Radiação Terrestre Global referente ao ano de 2011 no ISEL	71
Figura 5.7 - Estimativa PVGIS da energia produzida	72
Figura 5.8 – Energia Produzida nos meses de Fevereiro a Julho – Ano 2011	73
Figura 5.9 - Energia Produzida nos meses de Fevereiro a Maio – Ano 2012	73
Figura A. 1- Configuração dos Parâmetros da simulação	83
Figura A. 2- Subsistema do modelo modificado – I_{cc}	84
Figura A. 3 - Subsistema do modelo modificado - I_0 de referência.....	84
Figura A. 4 - Subsistema do modelo modificado - V_T referência	84
Figura A. 5 - Subsistema do modelo modificado - I_0	85
Figura A. 6 - Subsistema do modelo modificado - m'	85
Figura A. 7 - Subsistema do modelo modificado – m	86
Figura A. 8 - Subsistema do modelo modificado – V_T	86
Figura A. 9 - Subsistema do modelo modificado - I	86
Figura B. 1 - Local da instalação (Google Maps).....	87
Figura B. 2 - Energia acumulada dos módulos instalados- 2011	89
Figura B. 3 - Energia captada 2011/2012	90
Figura B. 4 - Potência diária.....	91

Lista de Acrónimos

Se	Selénio
PV	Fotovoltaico (PhotoVoltaic)
CZ	Czochralski
Si	Silício
c-Si	Silício cristalino
a-Si	Silício amorfo
CuInSe	Cobre índio selénio
CdTe	Cadium telluride
DSC	Dye-sensitized Cells
NREL	National Renewable Energy Laboratory
GaInP	Gálio Índio Fósforo
GaAS	Arseneto de gálio
Ge	Germânio
MOVPE	MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy
CSG	Crystalline Silicon on Glass
TCO	Óxido Transparente Condutor (Transparent and Conductive Oxide)
CIGS	Cobre Índio Gálio Seleneto
CEO	Chief Executive Officer
VHESC	Very High Efficiency Solar Cell
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
UD	Universidade Delaware
ESTI	European Solar Test Instalation
CPV	Concentradores Fotovoltaicos
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
AIST	Research Center for Photovoltaics

GaInAs	Arseneto de Gálio e Índio
I_d	Corrente diode
I_0	Corrente inversa máxima de saturação do díodo
V	Tensão
m	Factor de idealidade do díodo
V_T	Potencial térmico
K	Constante Boltzman
T	Temperatura
q	Carga do electrão
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
P	Potência
P_{max}	Potência no ponto de potência máxima
G	Radiação solar
A	Área da célula
η	Rendimento
FF	Factor de Forma
STC	Standard Test Conditions
ϵ	Emissividade
N_{SM}	Número de células ligadas em série
R_s	Resistência série
R_p	Resistência paralela
GUI	Interface gráfica do utilizador
F	Distância entre painéis PV
Fe	Factor de espaçamento
H_0	Altura do objecto
H_m	Altura em relação ao nível do solo
PVGIS	Photovoltaic Geographical information System

IMP	Corrente no ponto de potência máxima
MPP	Maximun Power Point
VMP	Tensão no ponto de potência máxima
PP_{max}	Ponto potência máxima

1 Introdução

Neste capítulo iremos fazer a introdução ao tema que irá ser alvo de estudo neste trabalho. Começaremos por apresentar a motivação, de seguida apresentaremos os objectivos e para finalizar iremos descrever a organização do presente trabalho de dissertação.

1.1 Motivação

O recurso às energias renováveis para suprimir as necessidades da sociedade moderna, perante o aumento do consumo de energia causado por factores como o aumento demográfico e mudanças climáticas é hoje cada vez mais uma realidade actual e necessária. No entanto o elevado custo inicial dos sistemas fotovoltaicos aliado aos problemas climáticos que podem afectar o desempenho dos módulos fotovoltaicos são entraves ainda a esta tecnologia. Numa instalação fotovoltaica vários são os factores que condicionam o seu desempenho, desde a inclinação dos módulos PV até a situações climáticas como a acumulação de poeiras ou o aumento da temperatura das células solares. Perante estas condicionantes torna-se necessário ter um bom conhecimento do clima do local onde irá ser instalado o sistema fotovoltaico (SF).

Hoje em dia há sistemas fotovoltaicos instalados em todo o mundo, seja de menor ou maior potência. No entanto existe uma certa dificuldade na optimização do desempenho destas mesmas instalações PV. Há SF instalados em regiões ensolarados, com optimização de ângulos de inclinação para as diferentes estações do ano, com seguidores solares, com manutenções periódicas e controladas, mas que ainda assim têm problemas relativos ao rendimento dos painéis principalmente nas épocas mais quentes, devido ao aumento da temperatura das células PV. É neste âmbito que surge a principal motivação para este trabalho, que tem ainda mais relevo se se tiver em conta o custo relativamente caro dos SF.

1.2 Objectivos

Este trabalho tem como objectivo principal estudar o efeito do aumento da temperatura nas células fotovoltaicas. Pretende-se desenvolver alternativas para se refrigerar as células a fim de se maximizar o seu desempenho.

Para a realização deste estudo, numa fase inicial, recorreu-se à uma Modelação Matemática de uma célula fotovoltaica. A modelação matemática feita em Simulink/Matlab têm como

objectivo perceber e analisar o comportamento eléctrico de uma célula solar fotovoltaica quando exposta à radiação.

Numa fase posterior as células fotovoltaicas serão ensaiadas no laboratório sob um ambiente controlado. Primeiro serão ensaiadas sem nenhum tipo de arrefecimento, depois com ventilação e por fim com um sistema de serpentina e água. Neste último ensaio será interessante verificar se o arrefecimento é viável e se se pode reaproveitar a água para outros fins.

Ainda no âmbito da energia solar fotovoltaica estudou-se uma instalação de um sistema fotovoltaico ligado à rede, no Laboratório de máquinas eléctricas do ISEL.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

Este presente trabalho de dissertação está organizado em 6 capítulos. Neste 1º capítulo faz-se uma abordagem inicial ao tema do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados os marcos históricos da evolução fotovoltaica numa breve resenha histórica, como também a evolução do mercado fotovoltaico e respectiva produção na última década. São abordados os recentes feitos relativos à eficiência de conversão fotovoltaica de vários dispositivos solares fotovoltaicos. Por fim é feita uma descrição de uma célula solar, desde a estrutura, princípio de funcionamento até às tecnologias das células fotovoltaicas.

No capítulo 3 é feito um estudo teórico e respectiva análise de três modelos teóricos equivalentes de uma célula solar fotovoltaica. Posteriormente é apresentado a respectiva modelação matemática em *Simulink/matlab* de cada modelo teórico abordado. Depois da simulação e comparação dos modelos matemáticos é desenvolvido um modelo modificado para estudar a influência da temperatura no comportamento de uma célula fotovoltaica.

No capítulo 4 é descrita a montagem experimental utilizada para se ensaiar as células e os respectivos meios de arrefecimento. São apresentados os respectivos gráficos I (A), V (V), P (W) de cada sistema de arrefecimento. Ainda neste capítulo é feita uma discussão dos resultados dos diferentes ensaios realizados. Serão apresentados tabelas e gráficos referentes às experiências realizadas.

O capítulo 5 refere-se à montagem e instalação de módulos fotovoltaicos no ISEL. É feita uma análise ao local, aos painéis a serem utilizados, os tipos de estruturas de fixação e de possíveis causas que podem levar a uma restrição no desempenho dos módulos. Neste capítulo ainda são apresentados os dados e gráficos da monitorização do sistema ligado à rede.

No capítulo 6, são mencionadas as conclusões e sugestões de desenvolvimento futuro.

2 Célula Fotovoltaica

Neste capítulo faz-se uma breve descrição do estado da arte da célula fotovoltaica onde abordaremos os marcos importantes da evolução da energia fotovoltaica bem como os vários tipos de células e aplicações. Faz-se ainda uma breve introdução sobre o efeito fotovoltaico, funcionamento da célula fotovoltaica e o tipo de células fotovoltaicas.

2.1 Breve estado da arte do efeito fotovoltaico

A célula solar é um dispositivo que permite converter a radiação electromagnética (como a luz) em energia eléctrica. O fenómeno da conversão da luz em energia eléctrica (efeito fotovoltaico) foi descoberto em 1839 pelo físico francês *Alexandre Edmond Becquerel*. *Edmond Becquerel* constatou que placas metálicas de platina ou de prata, mergulhadas num electrólito produziam uma pequena diferença de potencial, quando expostas à luz. [1] [2]

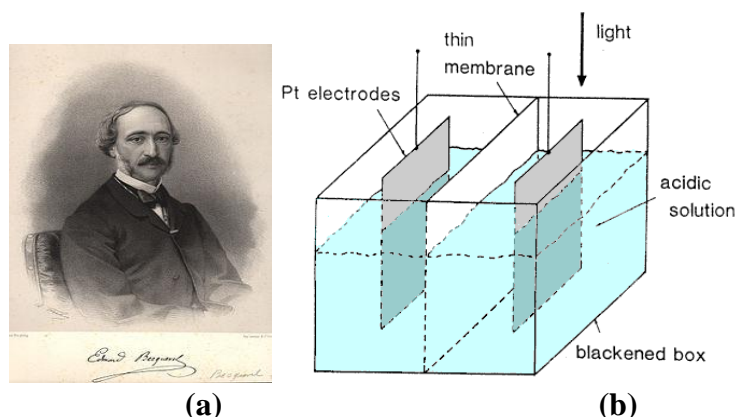


Figura 2.1 - (a) Edmond Becquerel (1820-1891). (b) Experiência realizada por Becquerel¹

Willoughby Smith, em 1873, descobriu o efeito fotovoltaico num material semiconductor, o selénio (Se). Três anos depois, em 1876, *William Grylls Adams* e *Richard Evans Days* comprovavam que o Se produzia energia eléctrica quando exposto à luz, construindo nessa época a primeira célula fotovoltaica com um rendimento estimado em 1%. No ano de 1883, *Charles Fritts*, inventor norte-americano, descreveu uma célula solar, em que o semiconductor era o Se e a mesma era revestida por uma camada fina de ouro. [3]

Em 1900 *Max planck* publicou a teoria de que a matéria só pode emitir ou absorver energia em pequenas unidades discretas designada pelo termo *quantum*. A partir da teoria de *Planck*, *Albert*

¹ <http://pvcdrom.pveducation.org/MANUFACT/FIRST.HTM>

Einstein, em 1905, explicou o fenómeno do efeito fotoelétrico, que é caracterizado pela emissão de electrões por parte de certos metais quando expostos a uma radiação electromagnética como por exemplo a luz. O efeito fotoelétrico só viria a ser comprovado experimentalmente em 1916, por *Robert Andrews Millikan*. A publicação viria a valer-lhe o Prémio Nobel em 1921. [4]

Em 1916, *Jan Czochralski*, químico polaco, descobriu o método de crescimento de cristais utilizado para obtenção de monocristais de elevada pureza, é utilizado nas mais variadas áreas e aplicações electrónicas. *Czochralski* realizou esta descoberta enquanto investigava a velocidade de cristalização de alguns metais. O método CZ foi objecto de vários estudos e investigações, sendo que nos meados dos anos 50, há uma grande evolução e desenvolveu-se um método para produção de silício cristalino com elevado grau de pureza. Um ano depois, em 1951, surge a primeira junção PN, o que possibilitou a produção de células a partir de um único cristal de germânio. Nos anos que se seguiram detectou-se também o fenómeno fotovoltaico em outros materiais. [5]

Em 1954, *Gerald Pearson, Dary Chapin e Calvin Fuller*, fabricaram a primeira célula de Si, que quando testada pela primeira vez, sujeito a uma forte exposição à luz solar, apresentava uma eficiência 5 vezes superior às células solares de selénio existentes na época. A célula solar desenvolvida pelos três cientistas dos laboratórios Bell tinha um rendimento eléctrico na ordem dos 6%. [6]

As células fotovoltaicas de silício viriam revolucionar a indústria fotovoltaica. Surgiram as primeiras aplicações de conversão fotovoltaica como luzes de flash, nos sistemas de telecomunicações e bóias de sinalização. Posteriormente surgiu as primeiras aplicações na área espacial. A utilização de um conjunto células fotovoltaicas para alimentar o rádio comunicador de um satélite nos Estados Unidos revelou-se um grande sucesso. A eficiência da experiência foi de tal forma significativa que desde então a energia solar fotovoltaica tem sido parte integrante do programa espacial dos Estados Unidos. [2]

Projectos e investigações no campo da energia fotovoltaica continuaram a crescer substancialmente e cada vez mais em função do aumento da eficiência das células fotovoltaicas de Si. A *Hoffman Electronics* foi líder destacado na produção de células fotovoltaicas de Si entre 1955 a 1960. Em 1957 conseguiram aumentar a eficiência divulgando, fruto das experiências e investigações realizadas, células com eficiência na ordem dos 8% e dois anos depois, em 1959 apresentaram células fotovoltaicas de c-Si com rendimento na ordem dos 10%. Um ano depois, em 1960, a *Hoffmann Electronics* em constante desenvolvimento divulgou células fotovoltaicas de Si com rendimentos na ordem dos 14%. [7]

Em 1963 começa a comercialização dos módulos fotovoltaicos de Si pela empresa japonesa *Sharp Corporation*. Além da produção de módulos fotovoltaicos com fins comerciais, a *Sharp* realizou uma instalação fotovoltaica de 242 W num farol, sendo na época o maior sistema fotovoltaico instalado. [8]

Fruto da crise do petróleo em 1970 que desencadeou mais investigações e actividades na área da energia fotovoltaica, teve como consequência o aparecimento do conceito da película fina. *David Carlson e Christopher Wronski* em 1976 apresentaram o primeiro trabalho sobre células fotovoltaicas de silício amorfo (a-Si). [9]

Entre 1970 e 1980 CuInSe, CdTe e a-Si foram o alvo de estudo e como resultado conseguiram-se obter células solares de filme fino com rendimentos na ordem dos 10%, de cada um dos três materiais semicondutores depositados.

Em 1990 regista-se uma expansão na produção de células solares de filme fino e um aumento da eficiência das células solares produzidas com rendimentos superiores a 10%. Investigadores da Universidade do Sul da Flórida, em 1992, desenvolveram uma célula fotovoltaica de filme fino com uma eficiência de 15.9%. O semicondutor utilizado foi o CdTe e conseguiu-se ultrapassar a barreira dos 15% de rendimento, na tecnologia de filme fino. [3] [10]

Na Suíça, em 1996, na Escola Politécnica Federal de Lausanne conseguiu-se obter as DSC's² com um rendimento de 11%. As dye-cells são células solares fotovoltaicas sensibilizadas por corantes e são resultado de uma tecnologia inovadora, simples e barata. Podem ser produzidas a partir de materiais de baixo custo tal como TiO₂ e o Carbono num processo sem vácuo. [11]

Spectrolab Inc. e NREL³ num parceria, desenvolveram em 1999, uma nova geração de célula solar fotovoltaica, constituída por três junções(GaInP/GaAs/Ge) e que atingia uma eficiência de conversão de 32.3 % quanto exposta a uma radiação de “47 suns” e AM 1.5⁴, ou seja quando exposta a uma radiação solar 47 vezes superior à utilizada nos testes padrões. Para a sua aplicação em termos práticos estas células são acompanhadas de um sistema de concentradores. As camadas ou junções das células foram crescidas epitaxialmente por MOVPE⁵. [12]

No dia 26 de Maio de 2000 a *BP Solarex* anuncia⁶ eficiências e potências recordes obtidos para os módulos de tecnologia filme fino CdTe (material policristalino). Dos valores divulgados e testados nos laboratórios pela NREL, o módulo *Apollo* com 0.94 m² atingiu uma eficiência de conversão de 10.6 % e uma potência de saída de 91.5 W, potência recorde para os módulos com

² Dye-sensitized cells

³ National Renewable Energy Laboratory

⁴ 47 suns equivale 47 kw/m² e AM 1.5 – Air Mass 1.5

⁵ MOVPE ou MOCVD - Metalorganic chemical vapour deposition

⁶ <http://www.bp.com/genericarticle.do?categoryId=2012968&contentId=2001894>

este tipo de tecnologia. A maior eficiência de conversão para módulos de filme fino é de 10.8%, foi obtida no módulo *Apollo* com 0.55m². [13]

Martin Green em 2001 demonstra através de cálculos a variação da eficiência das células solares de silício em função da espessura. Eficiência de 24,7% é obtida em células de silício cristalino com 1 µm de espessura. [14]

Devido aos custos das tecnologias que utilizam as bolachas de silício para a deposição das camadas que constituem uma célula fotovoltaica, principalmente no que se refere a aplicações PV de larga escala e também devido a questões ambientais causado por algumas tecnologias de filme fino desenvolveu-se o CSG – *Crystalline Silicon on Glass*- em 2004. CSG não é mais do que uma deposição directa do silício num substrato de vidro. O processo de fabrico é caracterizado por ser simples. A tecnologia CGS apresenta algumas vantagens tais como a não utilização do TCO e a sua durabilidade. Foi fabricado um mini módulo com uma eficiência entre 8-9% que um ano depois aumentou para os 12-13%. [15] [16]

A indústria fotovoltaica tem crescido rapidamente mas de uma forma algo limitada, devido à escassez de fábricas do silício policristalino, nomeadamente entre 2004-2006. Em 2006 pela primeira vez mais de metade da produção mundial do silício policristalino foi para o mercado PV. Resultado desta iniciativa de 2006 foi o aumento da produção fotovoltaica Mundial em 2007 em mais de 50%. ⁷⁻⁸

Em 2006 a Nanosolar Inc., anunciou a célula solar mais eficiente com a tecnologia CIGS. A eficiência de conversão medida pela NREL foi de 14.5%. [17]

A Nanosolar Inc., em 2007, divulgou numa conferência do seu CEO *Martin Roscheisen*, que tinham exportado os primeiros painéis de tecnologia CIGS com fins comerciais, em que o destino era uma instalação PV na Alemanha.⁹

Um dos maiores objectivos da indústria PV foi sempre desenvolver células e dispositivos solares de alta eficiência a baixo custo. Em Novembro de 2005 um consórcio/programa com 20 participantes liderado pela Universidade de Delaware e DuPont, e financiado pela DARPA foi criado com este intuito. O programa Very High Efficiency Solar Cell (VHESC) tinha como objectivo desenvolver células solares com eficiências de 50% até 2009. [18] Apenas 2 anos depois, os investigadores da UD revelaram o sucesso do programa, com o desenvolvimento de um sistema óptico integrado que permitia obter resultados de eficiência de 42.8%¹⁰. A célula VHESC é caracterizada por possuir um concentrador estático lateral que dividia o espectro da

⁷ <http://www.nanotech-now.com/columns/?article=323>

⁸ <http://climatepositive.org/news/article/221>

⁹ <http://web.archive.org/web/20080116115139/http://www.nanosolar.com/blog3/2007/12/18/nanosolar-ships-first-panels/>

¹⁰ <http://www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html>

radiação incidente em várias bandas, possui uma arquitectura que permite maximizar a eficiência do módulo. [19]

Em 2008 a NREL divulga um novo valor recorde em termos de eficiência solar de células solares de tripla junção (III-V). Uma conversão fotovoltaica de 40.8% foi conseguida para uma célula solar de tripla junção com duas junções metamórficas sujeita a uma radiação de 326 kW/m². A descrição da estrutura e do processo de fabrico da célula solar é descrito na referência [20]. As células solares foram fabricados e testados electricamente nos laboratórios da NREL.

A eficiência de conversão da luz solar em electricidade é um dos parâmetros mais importantes nos dispositivos fotovoltaicos. Investigações na área fotovoltaica foram sempre uma constante ao longo dos anos com o objectivo de conseguir melhorar o rendimento de conversão.

Alguns casos quanto a melhorias ou recordes de eficiência solar, quer de células, módulos ou concentradores solares são aqui descritos referente ao ano de 2010:

- Uma célula solar fotovoltaica de filme fino GaAS com 0.9989 cm² de área de abertura fabricada pela Alta Devices Inc., bateu o recorde de eficiência de conversão solar com 27.6%. Resultado comprovado pela NREL. [21]
- Segundo dados da NREL, uma célula polimérica orgânica com 1cm² fabricada pela Konarka¹¹ conseguiu 8.3% de eficiência, aumento significativo em relação ao recorde anterior que era 5.15%.
- Módulo solar de silício policristalino de 1.5 m², fabricado pela Schott Solar e testado pela European Solar Test Instalation (ESTI) conseguiu um novo recorde no que diz respeito á eficiência solar com 17.55%¹².
- Célula solar de silício cristalino com uma área de 155cm² fabricada pela SunPower atingiu uma eficiência de 24.2% nos laboratórios da NREL. [22]
- Novo recorde de conversão é conseguido nos laboratórios da NREL [23] para um pequeno módulo CPV (0.202 cm² – área de abertura), constituída por células solares multijunção (GaInP/GaAs) e com um componente óptico capaz de concentrar e direccionar espectralmente a radiação incidente. Com uma radiação de teste equivalente a 20 KW e assumindo as perdas ópticas e as perdas devido ao encapsulamento do módulo, ao contrário de outros casos [19], [20] e [24], conseguiu-se uma eficiência de conversão de 38.5 %.

¹¹http://www.konarka.com/index.php/site/pressreleasedetail/konarkas_power_plastic_achieves_world_record_83_efficiency_certification_fr

¹²<http://www.schott.com/english/news/press.html?NID=2948>

Casos mais recentes, de 2011, sobre recordes ou melhorias quanto a eficiência de conversão solar fotovoltaica:

- Registo para um aumento da eficiência de 27.6% para 28.3% medida pela NREL, numa célula solar III-V de GaAs fabricada pela Alta Devices Inc.
- *Dye-cell* com uma área de 1cm^2 fabricada pela Sharp conseguiu uma eficiência de 11%, um aumento de 0.1% comparado com os valores anteriormente divulgados pela AIST¹³.
- Um novo recorde de eficiência é divulgado nesse ano para um módulo de silício policristalino de 1.5m^2 . Uma eficiência de 18.2% é obtida nas instalações da ISPRA¹⁴.
- Um módulo de filme fino de GaAs obteve uma eficiência de 23.5% nos laboratórios da NREL. Trata-se de um módulo de 857 cm^2 fabricado pela Alta Devices¹⁵.
- A maior eficiência sem recurso a concentradores foi obtida nas instalações da AIST, para uma célula de dimensões reduzidas (0.89 cm^2) fabricada pela Sharp. Uma eficiência de 36.9 % foi divulgado para a célula multijunção GaInP/ GaAs/GaInAs, embora este valor não foi considerado um recorde absoluto devido às dimensões reduzidas da célula. [25].

2.2 Evolução da Produção e Instalação PV na última década

Com os avanços na indústria electrónica devido em grande parte ao contributo da energia fotovoltaica, a produção fotovoltaica, em 1883, ultrapassou os 9,3 MW. A década de 90 é marcada pelo aparecimento das células de película fina.

O mercado fotovoltaico é um dos mais dinâmicos no panorama energético. Desde 2000 que a produção total da energia fotovoltaica mundial aumentou mais de 30 vezes com taxas de crescimentos anuais entre os 40% a 50 %. Nos últimos 5 anos a produção fotovoltaica mundial teve um crescimento bastante significativo, devido a um forte investimento desenvolvido nas áreas das energias renováveis e eficiência energética. China e Taiwan são um dos principais responsáveis por este acréscimo e, em conjunto, actualmente correspondem a 50% de toda a produção fotovoltaica mundial. [26]

¹³ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

¹⁴ European Solar Test Installation

¹⁵ http://www.pv-tech.org/news/alta_solar_panel_receives_nrel_verification_of_23.5_efficiency

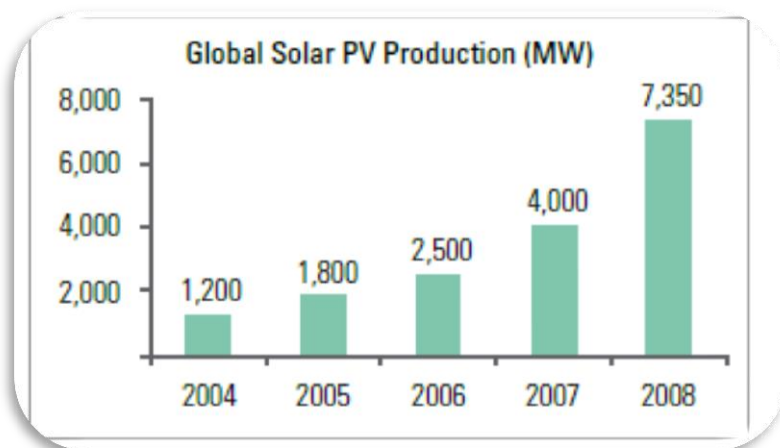


Figura 2.2 - Produção PV Mundial [27]

Em 2008 o valor da produção fotovoltaica já ultrapassara os 4 GW em termos de capacidade instalada, com um crescimento anual médio na ordem dos 30 % da produção mundial. Em comparação com ao ano transacto a produção fotovoltaica Mundial aumentou cerca de 84%, ou seja foi estimada em 7.3 GW. Para este aumento muito contribuiu o mercado espanhol neste ano. As instalações de sistemas PV no mundo em 2008 foram bastante superiores comparativamente a 2007, sendo estimada entre 5.7 e 6 GW. [27]

O mercado fotovoltaico sempre em constante crescimento e desenvolvimento, teve em 2009 um aumento considerável na ordem dos 40 a 50% em comparação com o ano de 2008. Contudo os resultados em relação ao ano de 2009 apresentam algumas incertezas devido à crise sentida no primeiro semestre deste ano. O mercado fotovoltaico em 2009 é marcado por um declínio no primeiro semestre e um excepcional “boom” na segunda metade do ano, sendo que a estimativa da produção fotovoltaica neste ano é de 11.5 GW (Figura 2.4).

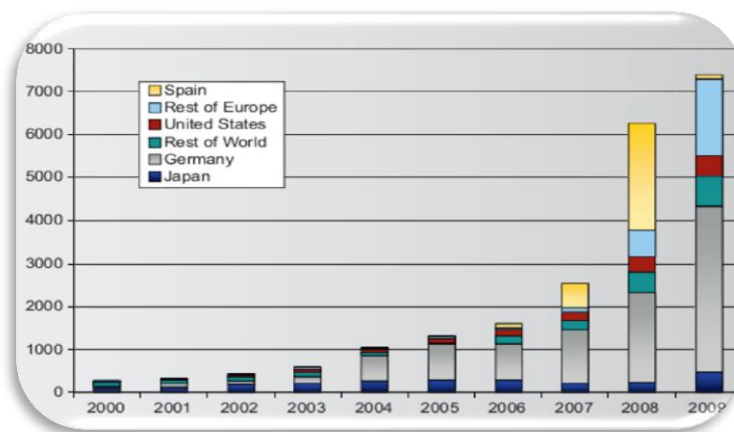


Figura 2.3 – Evolução da Instalação PV anual (MW) (2000-2009) [26]

Com o mercado fotovoltaico bastante incerto no ano 2009, os resultados finais da estimativa quer da produção e quer da instalação fotovoltaica foram surpreendentes. Em geral, o mercado

fotovoltaico Alemão esteve bastante activo em 2009 com uma instalação fotovoltaica a rondar os 3.8 GW sendo que 60% destas são instalações fotovoltaicas ligadas à rede eléctrica. Os restantes mercados foram o Italiano com 730 MW seguido pelo Japonês (484 MW), USA (470 MW), República Checa (411 MW) e Bélgica (308 MW). [26]

Em 2010 a produção de módulos fotovoltaicos mais do que duplicou, com um volume de produção a variar entre os 18 e 27 GW.

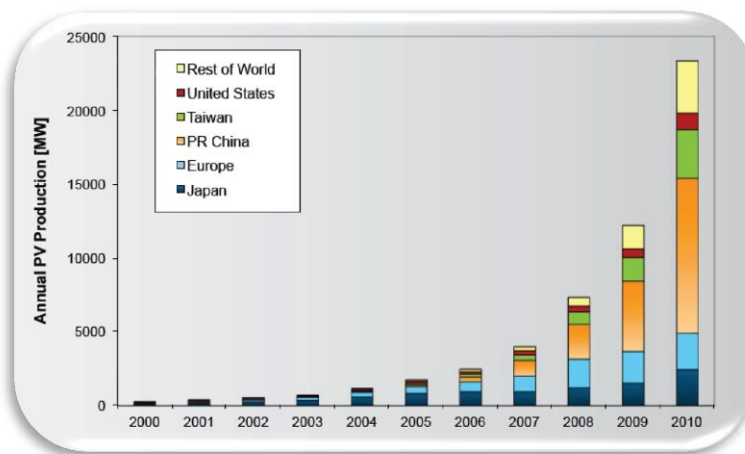


Figura 2.4 - Evolução da Produção PV Mundial (2000-2010) [28]

A eficiência dos módulos PV comercializados varia entre 12-20%, sendo que os módulos monocristalinos tinham uma eficiência entre 14 e 20% e módulos PV policristalinos entre os 12 e 17%. Quanto à instalação de sistemas PV mais uma vez dominada pelos sistemas ligados à rede, verificou-se uma variação entre 17 e 19 GW. Para o aumento significativo em 2010, muito contribuiu o mercado fotovoltaico Asiático e vários investimentos realizados nas áreas das energias renováveis e eficiência energética. Em termos de investimentos o ano de 2010 teve um aumento de 30% em relação ao ano de 2009, sendo o continente Europeu líder em investimentos realizados na área das energias renováveis. [28]

O recurso à energia solar fotovoltaica continua a aumentar mesmo perante a actual crise económica e financeira. A indústria PV como tem sido hábito ao longo dos últimos anos é o que apresenta taxas de crescimento mais rápido tanto na Europa como no resto do mundo, superando sempre as previsões ano após ano. Mas como era de esperar, este rápido crescimento não seria para sempre. A indústria fotovoltaica é actualmente a terceira maior fonte de energia renovável no que se refere a sistemas instalados, superado apenas pela energia hidráulica e eólica. O mercado fotovoltaico agora numa fase de consolidação a curto-prazo, teve em 2011 resultados com as taxas de crescimento mais baixo desde 2003. Mesmo assim a produção global

de células PV em 2011 aumentou 36% em relação a 2010 com uma produção de 37.2¹⁶ GW e uma subida significativa em relação aos 27.4 GW de 2010.

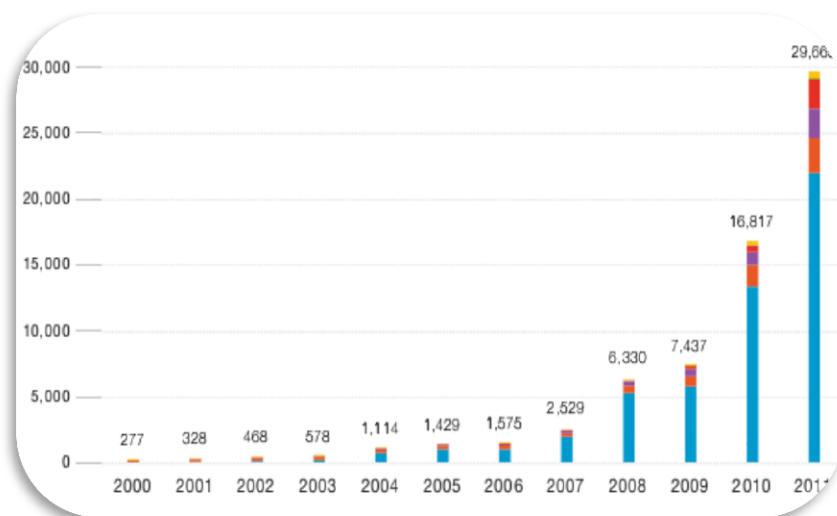


Figura 2.5 - Evolução da instalação PV 2000-2011 (MW) (Fonte: Epia) [29]

Segundo os resultados divulgados pela Epia¹⁷, em 2011 foram instalados e ligados à rede eléctrica, sistemas PV com uma potência de 29.7 GW. Na Europa, a potência instalada com ligação à rede em 2011 foi de 21.9 GW. A Europa é muito activa no mercado fotovoltaico sendo responsável por 75% da potência instalada. Itália foi líder no mercado PV em 2011, com uma potência instalada e ligada à rede de 9.3 GW, tem sido líder na última década, seguida pela Alemanha com 7.5 GW.

¹⁶ <http://solartribune.com/2012-04-02photon-pv-cell-production-rose-to-37-gw-in-2011/#.UA13yyVISgh>

¹⁷ European Photovoltaic Industry Association

2.3 Descrição da célula solar fotovoltaica

Uma célula solar, unidade fundamental de um sistema fotovoltaico, é um dispositivo que converte directamente uma radiação electromagnética em energia eléctrica através do efeito fotovoltaico [2]. Esta conversão é devido a processos que se desenvolvem a nível atómico nos materiais semicondutores, que consiste na emissão de um electrão da banda de valência para a banda de condução quando um fotão incide na célula. A célula é o menor elemento do sistema fotovoltaico, produzindo tipicamente potências eléctricas da ordem de 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,7V e uma corrente típica de 3 A).

2.3.1 Semicondutores

As células solares PV são constituídas por pelo menos duas camadas de material semicondutor. Os semicondutores são materiais de condutividade eléctrica intermediária entre materiais metálicos e isolantes. A condutividade dos semicondutores depende da temperatura a que é submetido o material e são bastante sensíveis às impurezas na sua estrutura. Os materiais semicondutores podem ser classificados como [30]:

- **Semicondutor intrínseco** é um semicondutor no estado puro. À temperatura de zero graus absolutos (-273°C) comporta-se como um isolante, mas à temperatura ambiente (20°C) já se torna um condutor pois o calor fornece a energia térmica necessária para que alguns dos electrões de valência deixem a ligação covalente (deixando no seu lugar um buraco) passando a existir alguns electrões livres no semicondutor.
- **Semicondutor extrínseco** é um semicondutor ao qual são adicionados impurezas (dopagem), e em que as propriedades eléctricas são influenciadas pelo tipo e concentração das impurezas adicionadas.

As células solares podem ser construídas com diferentes tipos de materiais semicondutores. Os mais utilizados são o silício (Si), o arseneto de gálio (GaAs), o disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂) e o telureto de cádmio (CdTe).

Contudo o Si é ainda o material semicondutor mais utilizado no fabrico das células fotovoltaicas, por ser o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre. Os tipos mais comuns de silício utilizados na fabricação das células solares são: o silício monocristalino, policristalino e amorfo ou filme fino (thin-film) em que o filme é depositado através de processos de deposição de vapores.

O Si devido às suas propriedades físicas e eléctricas, e devido também a sua abundância na natureza têm ainda hoje um papel relevante na indústria electrónica e microelectrónica. O Si na sua forma cristalina ou policristalina tem um hiato de energia indirecto de 1,12 eV a 25°C, que resulta num baixo coeficiente de absorção óptica numa importante zona do espectro solar, o que é uma desvantagem em termos de aplicações fotovoltaicas. Apesar disso, e pelas razões acima mencionadas, é o mais utilizado na indústria PV.

2.3.2 Estrutura da Célula PV

Uma célula solar típica de silício cristalino ou policristalino é geralmente formada por uma junção semicondutora p-n, a qual é composta por uma região dopada por impurezas aceitadoras (tipo p) e outra região composta de impurezas doadoras (tipo n), e a zona entre estas regiões é denominada de região de carga espacial a qual dá origem a um campo eléctrico, responsável pelo funcionamento da junção p-n. Uma estrutura típica de uma célula fotovoltaica é apresentada na Figura 2.6

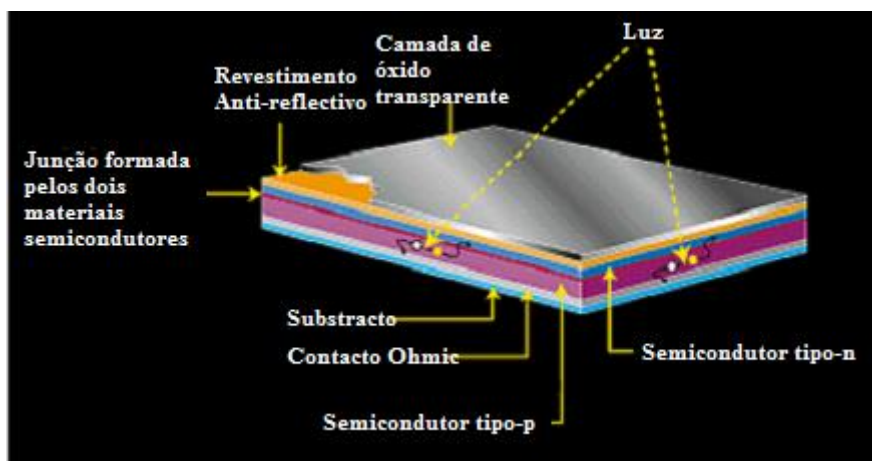


Figura 2.6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica referência¹⁸

Uma camada anti reflectora é utilizada na camada frontal com o objectivo de minimizar as perdas por reflexão da luz. Na figura apresentada é utilizado como contacto frontal, uma camada de óxido que é simultaneamente transparente à luz visível altamente condutora.

2.3.3 Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica

As células solares, como já foi mencionado, são dispositivos fotovoltaicos que convertem a luz solar (radiação electromagnética) em energia eléctrica. O funcionamento de uma célula fotovoltaica pode ser explicado recorrendo ao princípio de funcionamento de uma junção p-n. Na junção semicondutora p-n há uma difusão dos electrões livres do lado n para o lado p onde

¹⁸ http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_thin_film_cell.html

encontram os buracos que os capturam. Devido a esse deslocamento há uma acumulação de impurezas ionizadas negativamente (aniões) no lado p, e do lado n impurezas ionizadas positivamente (catiões). Desse modo, há formação de um campo eléctrico, na região da junção, que estabelece uma barreira de energia potencial dificultando a passagem dos electrões livres do lado n para o lado p atingindo a situação de equilíbrio dinâmico.

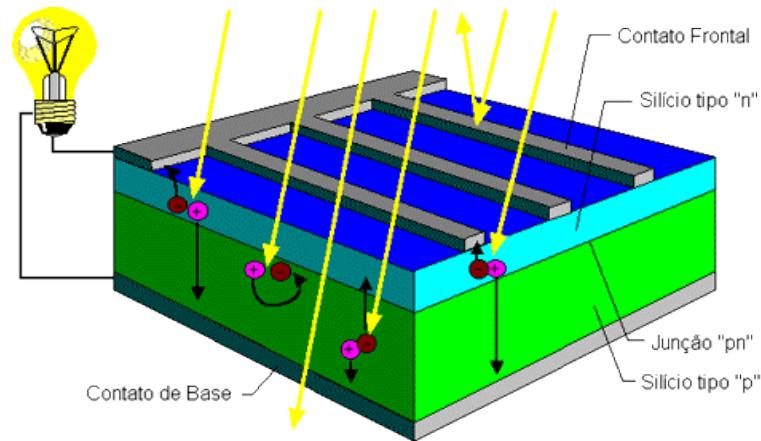


Figura 2.7 - Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica¹⁹

A radiação electromagnética ao incidir na célula solar é absorvida se a energia dos fotões for superior ao hiato energético do semiconductor ocorrendo a geração pares electrão - buraco. Os portadores de carga gerados pela luz incidente são acelerados pelo campo eléctrico da junção gerando assim uma corrente através da junção. O aparecimento de uma diferença de potencial entre os dois lados da junção iluminada é devido à barreira de potencial originada pela junção p-n.

¹⁹ <http://www.renewable-energy-concepts.com/solarenergy/solar-technology/si-solar-cell-structure-function.html>

2.3.4 Tecnologia PV

As células fotovoltaicas (PV) distinguem-se em várias categorias consoante a estrutura do material semicondutor e dos processos e tecnologia de fabrico. Podem ser classificados em três subcategorias como se segue no esquema abaixo apresentado.

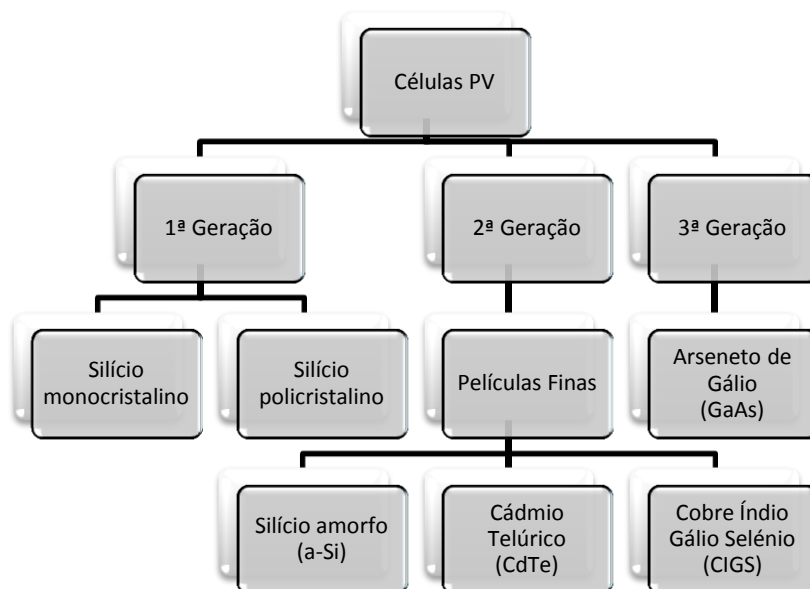


Figura 2.8 – Tecnologias das células PV

As células PV da 1ª geração provêm da tecnologia á base de material cristalino sendo que as Células PV da 2ª geração englobam as células de filme fino. A 3ª geração das células PV engloba soluções inovadoras caracterizadas pela elevada eficiência de conversão da luz solar (GaAs) e baixo custo.

2.3.4.1 Células PV - 1ª geração

As células de material cristalino (1ª geração) têm sido até hoje a tecnologia que tem dominado a indústria e o mercado fotovoltaico. Actualmente 90% dos dispositivos fotoelétricos são fabricados a partir do silício cristalino. As células PV da primeira geração englobam a tecnologia á base de Si monocristalino e policristalino. As células de silício monocristalino apresentam uma taxa de eficiência na conversão da luz solar na ordem dos 25%. A alta eficiência de conversão é conseguida com a utilização de materiais de elevada pureza e utilização de técnicas específicas (*czochralski*) para o crescimento do monocristal do Si. As células de Si policristalino são uma alternativa mais barata com um processo de fabrico mais barato, mas por outro lado a eficiência de conversão da luz é menor (20.4%) devido á menor pureza do material produzido [31].

2.3.4.2 Células PV - 2ª geração

As células de 2ª geração surgiram com o objectivo de diminuir os custos das células PV de 1ª geração e basicamente englobam as soluções de película fina. Devido à sua estrutura não cristalina as soluções de película fina apresentam eficiências de conversão mais baixas, requerendo uma área maior de células solares para atingir os mesmos valores de eficiência das células cristalinas. O processo de fabrico dos filmes finos é barato e tem como grande vantagem o peso e a versatilidade. Os filmes finos podem ser depositados em substratos de baixo custo como vidros, cerâmicos e alguns polímeros. A principal tecnologia nas ditas células de 2ª geração é o do a-Si que devido à sua versatilidade e flexibilidade é utilizado desde aplicações como integração em fachadas de edifícios ou cobertura de telhados até em calculadoras ou relógios. A eficiência de conversão obtida nas células a-Si é de 10.1% [32]. As células de disseleneto de cobre índio e gálio são compostos produzidos na forma de filmes finos. Estas são caracterizadas por serem constituídas por diferentes camadas dos ordem dos micrometros, possuindo hiatos energéticos distintos. O processo de fabrico permite que os filmes possam ser crescidos e depositados em vidros, polímeros e substratos flexíveis. A eficiência de conversão ronda actualmente os 19.6%²⁰. Para além das células de CuInSe₂ também as células de telureto de cádmio CdTe apresentam custos de fabrico relativamente baratos e esteticamente bastante atractivos apresentando-se normalmente sob a forma de placas de vidro num tom castanho/azul-escuro. A eficiência das células de CdTe depende do modo de fabrico das camadas, da temperatura e do tipo de substrato em que é feita a deposição. O recorde da eficiência de conversão destas células em laboratório ronda os 16.5 % [33]. A grande desvantagem desta tecnologia é o facto de o Cádmio ser uma substância tóxica.

2.3.4.3 Células PV - 3ª geração

Muitos dispositivos semicondutores desta 3ª geração ainda se encontram em fase de investigação e outros em protótipos laboratórios. A tecnologia desta geração não é baseada na tecnologia do Si e geralmente não depende da típica junção pn para separar os portadores de carga gerados. Fazem parte desta 3ª geração as células solares poliméricas e as células sensibilizadas com corante (dye-sensitized solar cells ou de *Grätzel*). Elas têm como vantagem um processo de fabrico com baixo consumo de energia.

Desta geração fazem também parte as células de tripla junção GaInp/GaAs/Ge utilizadas em satélites ou concentradores (CSP) devido principalmente à sua característica de resistência a altas temperaturas e radiação. Estas células podem atingir rendimentos entre os 25 e os 35% [34].

²⁰ <http://news.pv-insider.com/thin-film-pv/efficiency-196-cis-solar-cell-claimed>

3 Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica

Neste capítulo é aplicado em *Simulink/Matlab* um modelo matemático de uma célula solar utilizando o circuito eléctrico equivalente e que permite estudar o efeito da temperatura e da radiação no comportamento de uma célula fotovoltaica. Na simulação foram analisados três possíveis modelos teóricos de uma célula solar equivalente.

3.1 Modelo teórico simplificado da célula fotovoltaica

O funcionamento da célula fotovoltaica pode ser descrito por um circuito eléctrico equivalente constituído por um gerador de corrente eléctrica accionada por luz em paralelo com um díodo e uma carga (Figura 3.1).

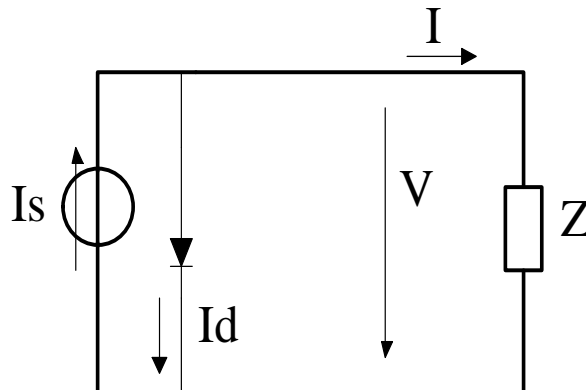


Figura 3.1 - Circuito eléctrico equivalente de uma célula PV

O modelo apresentado na figura é um modelo simplificado da célula solar. A fonte de corrente, I_s , representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa. Esta corrente eléctrica unidireccional é constante para uma dada radiação incidente. A corrente I_d , representa a corrente no escuro do díodo, a qual tem sentido contrário a I_s .

A corrente I_d através do díodo é dada pela expressão:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (\text{A}) \quad (3.1)$$

Em que:

- I_d Corrente unidireccional
- I_0 Corrente Inversa máxima de saturação do díodo
- V Tensão aos terminais da célula
- m Factor de idealidade do díodo (díodo ideal $m=1$; díodo real $m > 1$)

Sendo V_T , o potencial térmico designado por:

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (3.2)$$

- K Constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T Temperatura absoluta da célula em kelvin (K) ($0^\circ\text{C}=273,15$ K)
- q Carga eléctrica do electrão ($q=1.602 \times 10^{-19}$ C)

Utilizando a primeira lei de Kirchhoff (lei dos nós), obtém-se a expressão para a corrente I que se fecha pela carga Z :

$$I = I_s - I_d \quad (3.3)$$

Combinando as equações (3.1) e (3.3):

$$I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (\text{A}) \quad (3.4)$$

3.1.1 Estudo dos pontos de funcionamento das células PV

As células PV são caracterizadas pela sua curva característica I-V, que representa a variação da corrente eléctrica que atravessa o dispositivo quando exposta à radiação solar, com carga variável aos terminais.

A Figura 3.2 representa a curva característica típica de uma célula fotovoltaica.

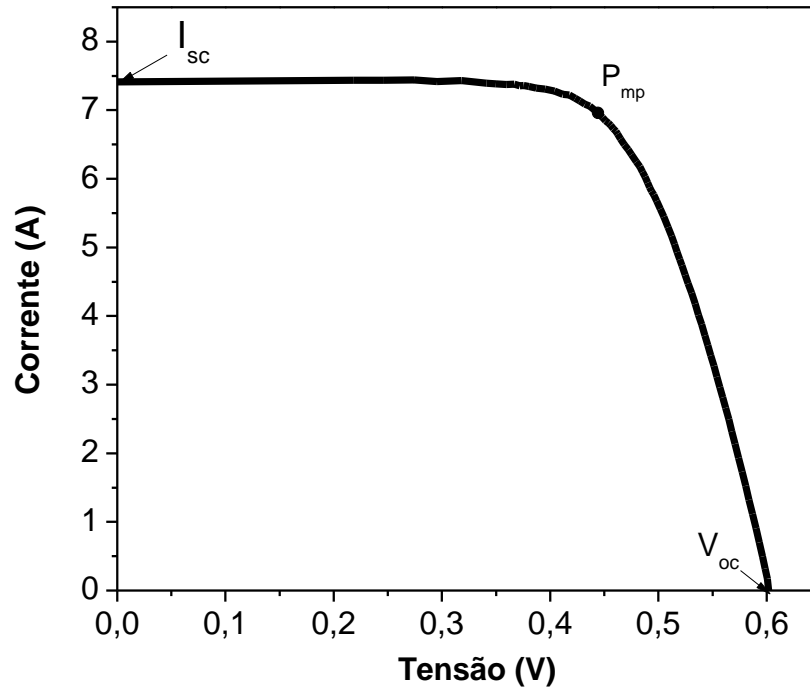


Figura 3.2 - Curva característica típica de uma célula solar PV

Analisando a Figura 3.2 pode-se considerar três parâmetros característicos de funcionamento da célula fotovoltaica: corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), e o ponto de potência máxima. Estes parâmetros variam com o nível de radiação e temperatura da célula.

- Curto-circuito exterior:

Quando uma célula é colocada em curto-circuito, a corrente atinge o seu máximo (I_{sc}) e a tensão que a atravessa é zero.

$$V = 0$$

$$I_d = 0$$

$$I = I_s = I_{sc} \quad (3.5)$$

A corrente de curto-circuito, I_{sc} , é o valor máximo da célula, portanto igual à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é característico da célula, sendo um dado fornecido pelo

fabricante nas condições de referência (STC). As condições STC a considerar são a radiação incidente de 1kW/m^2 e a temperatura da célula a 25°C .

- Circuito aberto:

Quando o circuito da célula está aberto, a tensão atinge o seu máximo (V_{oc}). V_{oc} , também é um parâmetro característico da célula sendo fornecido pelo fabricante nas condições de referência STC.

$$I = 0$$

$$V = V_{oc}$$

Substituindo na equação (3.4) temos:

$$V_{oc} = mV_T \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right) \quad (\text{V}) \quad (3.6)$$

3.1.2 Potência eléctrica

A Figura 3.3 - Curva característica típica Potência-Tensão de uma célula PV é obtida fazendo o produto da corrente pela tensão (da curva de figure 3.2).

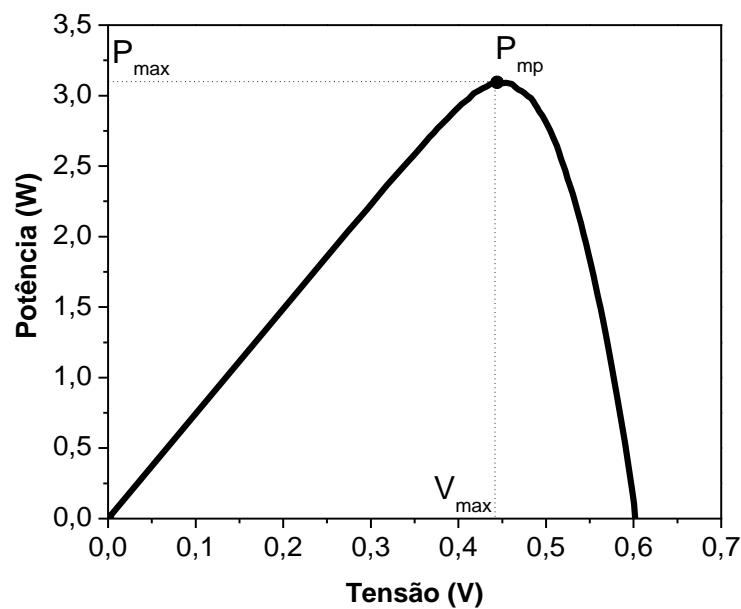


Figura 3.3 - Curva característica típica Potência-Tensão de uma célula PV

A potência eléctrica da célula é determinada a partir de:

$$P = V \times I = V \left(I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \right) \quad (3.7)$$

A potência máxima obtém-se para $\frac{dP}{dV} = 0$:

$$I_{sc} + I_0 \left(1 - e^{\frac{V}{mV_T}} - \frac{V}{mV_T} e^{\frac{V}{mV_T}} \right) = 0 \quad (3.8)$$

$$e^{\frac{V}{mV_T}} = \frac{\frac{I_{sc}}{I_0} + 1}{1 + \frac{V}{mV_T}} \quad (3.9)$$

Aplicando métodos iterativos à equação (3.9), pois é uma equação não linear, obtém-se a tensão máxima externa $V = V_{max}$ e a corrente correspondente I_{max} . A potência máxima que é entregue à carga correspondente ao ponto P_{mp} (Figura 3.3), é obtida através de:

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (W) \quad (3.10)$$

Nas condições de referência será $V = V_{max}^r$, $I = I_{max}^r$ e $P = P_{max}^r$. O índice “r” indica que os parâmetros citados foram determinados nas condições STC. São parâmetros característicos da célula fotovoltaica, sendo disponibilizado pelos fabricantes das mesmas.

3.1.3 Rendimento eléctrico e Factor de forma

O rendimento eléctrico de uma célula PV nas condições de referência é obtido através do quociente entre a potência no ponto de potência máxima e a potência da radiação incidente.

$$\eta^r = \frac{P_{max}^r}{A \times G^r} \quad (3.11)$$

Onde:

P_{max}^r - Potência máxima (W)

G^r - Radiação incidente por unidade de superfície (W/m²)

A - Área da célula (m²)

Para outro ponto de funcionamento da célula o rendimento é obtido através de:

$$\eta = \frac{P_{max}}{AxG} \quad (3.12)$$

O quociente entre a potência no ponto de potência máxima e o produto dado por V_{oc}^r e I_{sh}^r , chama-se factor de forma e obtém através da equação (3.13):

$$FF = \frac{P_{max}^r}{V_{oc}^r I_{sh}^r} \quad (3.13)$$

O factor de forma da célula é um critério de qualidade das células solares. O seu valor é sempre menor que um, e encontra-se normalmente entre 0.5 e 0.85.

3.1.4 Cálculo e desenvolvimento do modelo teórico simplificado

Para o desenvolvimento do modelo matemático da célula fotovoltaica, é necessário conhecer os parâmetros I_{max}^r , m (factor de idealidade do díodo) e I_0^r , (corrente inversa de saturação do díodo). Normalmente os fabricantes das células fotovoltaicas fornecem os valores de P_{max}^r , V_{oc}^r , I_{sc}^r , que permitem assim obter os parâmetros citados anteriormente.

$$I = I_s - I_0^r \left(e^{\frac{V}{mV_T^r}} - 1 \right) \quad (3.14)$$

Em curto-circuito:

$$I = I_s = I_{sc}^r \quad (3.15)$$

Em circuito aberto:

$$I_0^r = \frac{I_{sc}^r}{\left(e^{\frac{V_{oc}^r}{mV_T^r}} - 1 \right)} \quad (3.16)$$

Substituindo as equações (3.15) e (3.16) na equação (3.14) obtém-se:

$$I = I_{sc}^r \left[1 - \frac{\left(e^{\frac{V}{mV_T^r}} - 1 \right)}{\left(e^{\frac{V_{oc}^r}{mV_T^r}} - 1 \right)} \right] \quad (3.17)$$

Admitindo que:

$$e^{\frac{V}{mV_T^r}} \gg 1 \quad e \quad e^{\frac{V_{oc}^r}{mV_T^r}} \gg 1$$

Têm-se:

$$I = I_{sc}^r \left(1 - e^{\frac{V - V_{oc}^r}{mV_T^r}} \right) \quad (3.18)$$

Neste caso, o factor de idealidade m é um parâmetro de ajuste da curva característica I-V.

Se os valores dos parâmetros V_{max}^r e I_{max}^r forem fornecidos pelos fabricantes das células PV, o modelo pode ser refinado como se indica a seguir.

Nas condições de referência (STC) a equação (3.4), pode-se aplicar nos três pontos de funcionamento do circuito, circuito aberto, curto-circuito e no ponto de potência máxima.

$$0 = I_s^r - I_0^r \left(e^{\frac{V_{oc}^r}{mV_T^r}} - 1 \right) \quad \text{Em circuito aberto} \quad (3.19)$$

$$I_s^r = I_{sc}^r \quad \text{Em curto-circuito} \quad (3.20)$$

$$I_{max}^r = I_s^r - I_0^r \left(e^{\frac{V_{max}^r}{mV_T^r}} - 1 \right) \quad \text{Ponto de potência máxima} \quad (3.21)$$

Resolvendo a equação (3.19) em ordem a I_0^r , tendo em conta a expressão (3.20) e assumindo que a função exponencial é muito maior que 1 (como foi dito anteriormente), é possível simplificar a equação (3.21) em:

$$I_{max}^r = I_{sc}^r \left(1 - e^{\frac{V_{max}^r - V_{oc}^r}{mV_T^r}} \right) \quad (3.22)$$

A partir da equação (3.22) é possível obter facilmente o factor de idealidade do díodo resolvendo a equação em ordem à respectiva variável.

$$m = \frac{V_{max}^r - V_{oc}^r}{V_T^r \ln \left(1 - \frac{I_{max}^r}{I_{sc}^r} \right)} \quad (3.23)$$

O parâmetro m , depende apenas dos valores de referência, ou seja depende apenas das características das células, sendo assim um parâmetro contante para quaisquer condições ambientais.

Uma vez determinado o factor de idealidade do díodo m , o valor da corrente inversa de saturação é facilmente obtido através das equações (3.19) e (3.20), respectivamente aos pontos de funcionamento em circuito aberto e curto-circuito.

$$I_0^r = \frac{I_{sc}^r}{\frac{V_{oc}^r}{(e^{mV_T^r}-1)}} \quad (A) \quad (3.24)$$

Os parâmetros calculados anteriormente foram determinados nas condições de referência STC. Deste modo, torna-se necessário calcular esses parâmetros para qualquer radiação e qualquer temperatura ambiente, pois a condição 1kW/ m² de radiação incidente é conseguida apenas algumas horas por dia (dependendo da estação do ano). Em funcionamento, sob radiação solar, a temperatura da célula é muito superior á temperatura padrão (25°C) e dependente da temperatura ambiente. No verão a temperatura da célula pode atingir os 60°C. O factor de idealidade, m, é no entanto constante para quaisquer condições ambientais.

3.1.5 Variação da corrente de curto-circuito (I_{sc})

Para se calcular os parâmetros do modelo para além das condições STC, tem de se calcular a corrente de curto-circuito para qualquer radiação solar ou temperatura ambiente pois estes não são fornecidos pelo fabricante das células PV.

$$I_{sc} = I_{sc}^r \left(\frac{G}{G^r} \right) \quad (A) \quad (3.25)$$

Em que G é a radiação solar incidente (W/m²);

A corrente de curto-circuito da célula PV, praticamente não varia com a temperatura da célula e apresenta uma variação linear com a radiação solar incidente.

3.1.6 Corrente de saturação (I_0)

A corrente de saturação pode ser obtida através das características do material de que a célula é fabricada (silício) e da temperatura da célula.

$$I_0 = DT^3 e^{-\frac{\epsilon}{m'V_T}} \quad (A) \quad (3.26)$$

em que:.

- D Constante
- I_0 Corrente Inversa máxima de saturação do díodo
- ϵ Hiato de silício; $\epsilon=1.12$ eV
- m' Factor de idealidade do díodo; $m' = \frac{m}{N_{SM}}$ em que N_{SM} , é o número de células ligadas em série

- T Temperatura da célula em ° K
- V_T Potencial térmico em V

A variação da corrente inversa de saturação em função da temperatura pode ser obtida a partir da equação (3.26).

$$I_0 = I_0^r * \left(\frac{T}{T^r}\right)^3 * e^{\frac{eq}{mTK}\left(\frac{1}{T^r} - \frac{1}{T}\right)} \quad (\text{A}) \quad (3.27)$$

3.2 Modelo simplificado real

O modelo simplificado não é uma representação rigorosa da célula fotovoltaica. As células solares apresentam factor de perdas que devem ser tidos em conta. Especialmente a resistência dos contactos eléctricos e a corrente de fuga através da junção semicondutora devido a imperfeições do material, levando a uma queda de tensão nos terminais da célula. Estes dois parâmetros são respectivamente a resistência série (R_s) e paralelo (R_p).

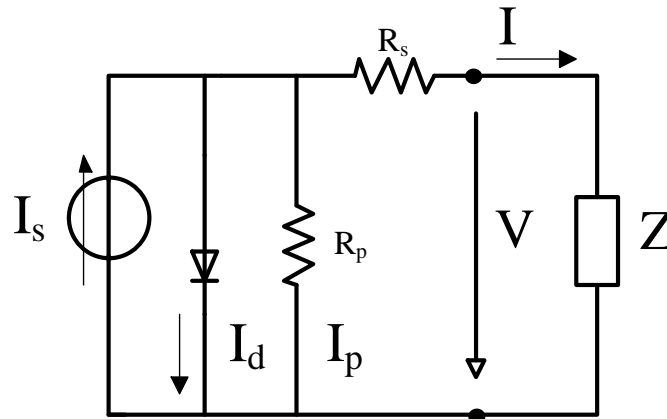


Figura 3.4 - Circuito eléctrico equivalente da célula PV, modelo real.

Como representado no capítulo anterior, a corrente que percorre a carga no modelo real é:

$$I = (I_s - I_d) * \frac{R_p}{R_p + R_s + Z} = \left(I_s - \left(I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \right) \right) * \frac{R_p}{R_p + R_s + Z} \quad (\text{A}) \quad (3.28)$$

3.3 Modelo de dois díodos

A potência máxima gerada por uma célula solar é dependente do factor de forma FF (secção 3.13). Numa célula solar que funciona como um díodo ideal existe apenas ocorrência de recombinação directa e o FF é em função de V_{oc} . Na prática, numa célula solar real, o valor de FF é menor do que o valor ideal devido às resistências R_p e R_s e da recombinação do díodo real. O díodo real é normalmente representado no circuito eléctrico equivalente por dois díodos, por um díodo ideal com o factor ideal igual à unidade e por um díodo real com factor de idealidade superior à unidade. Dos modelos acima apresentados, o modelo de dois díodos é o que descreve de forma mais rigorosa a célula fotovoltaica. Porém este modelo apresenta a desvantagem de não permitir o dimensionamento de uma instalação apenas com os dados fornecidos pelos fabricantes de painéis solares.

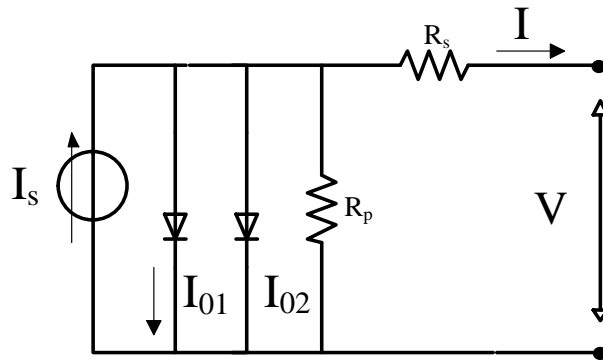


Figura 3.5 - Circuito eléctrico equivalente da célula PV, modelo de dois díodos

A corrente I na carga é obtida através de:

$$I = I_s - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{m_1 V_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{m_2 V_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (\text{A}) \quad (3.29)$$

3.4 Modelação em Simulink

Foram apresentados anteriormente três modelos matemáticos distintos para a célula PV. Tendo obtido todos os algoritmos, procedeu-se à modelação da célula PV em *Simulink/matlab*. O Simulink é uma ferramenta do *Matlab* utilizada para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos. O *Simulink/matlab* permite o uso de modelos matemáticos sem ser necessário conhecimentos de linguagens ou técnicas de programação computacional. A modelação em *Simulink* é feita numa interface gráfica do utilizador (GUI) utilizando diagrama de blocos.

3.4.1 Modelo simplificado em Simulink/Matlab

O modelo teórico simplificado foi o primeiro a ser desenvolvido em *Simulink/Matlab* utilizando o diagrama de blocos para a sua modelação. Para se desenvolver um modelo em *Simulink/Matlab* define-se o sinal de entrada para se poder obter a resposta do sistema. A partir da equação (3.4) e com o objectivo de se obter a curva característica I-V e P-V de uma célula PV, definiu-se a tensão V como o sinal de entrada e a corrente I como o sinal de saída. Geralmente para o estudo de sistemas dinâmicos são utilizados sinais de entrada particulares como as funções do degrau, rampa e impulso dependendo da resposta do sistema que se pretende.

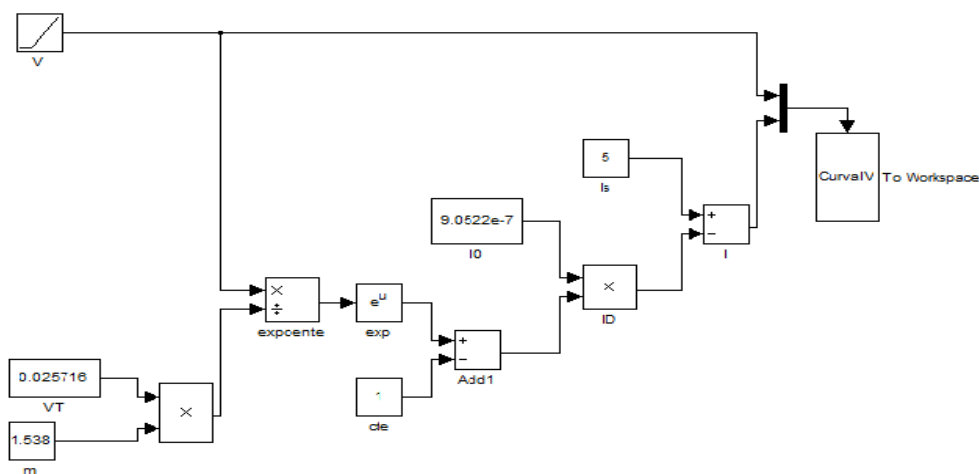


Figura 3.6 – Diagrama de blocos do modelo simplificado utilizado no *Simulink/Matlab*

No caso de estudo em questão e de acordo com o conhecimento dos componentes do sistema e da resposta do sistema que se prevê, a função do sinal de entrada escolhida foi a rampa unitária. Com o simples arrastar de blocos das bibliotecas do Simulink para a interface gráfica, construiu-se o modelo acima representado.

Tabela 3.1 – Parâmetros de uma célula PV do módulo BP585U (STC)

Parâmetros nas condições STC	
Corrente de curto-circuito (I_{sc}^r)	5 A
Corrente à potência máxima (I_{max}^r)	4.72 A
Tensão à potência máxima (V_{max}^r)	0.5 V
Temperatura da célula (T)	25 °C
Potência no ponto máximo (P_{max}^r)	2.36 W
Tensão de circuito aberto (V_{oc}^r)	0.614 V
Dimensões da célula	125 x 125 mm

Os parâmetros V_T , I_0 e m (factor de idealidade do diodo), foram calculados a partir das equações apresentadas na secção do modelo teórico simplificado e utilizados como valores constantes na modelação da célula. Os restantes parâmetros são de uma célula fotovoltaica do módulo BP 585U, nas condições STC utilizando os valores da Tabela 3.1 fornecidos pelo fabricante das células PV e concluído o modelo simplificado, é possível simular o sistema e obter a curva característica I-V da célula fotovoltaica em estudo.

3.4.1.1 Obtenção das curvas I-V e P-V – Modelo simplificado

Na modelação de sistemas em Simulink pode-se obter a resposta do sistema em gráficos ou valores (pelo bloco *Display*), conforme o pretendido. Com o objectivo de se obter o gráfico da curva I-V da célula PV em estudo, foi introduzido no modelo o bloco *To Workspace* da biblioteca *sink* do Simulink. O bloco *To Workspace* escreve na área de trabalho do Matlab os dados da simulação do sinal que lhe for inserido. Com os dados obtidos da simulação fez-se o gráfico da curva característica I-V do modelo simplificado.

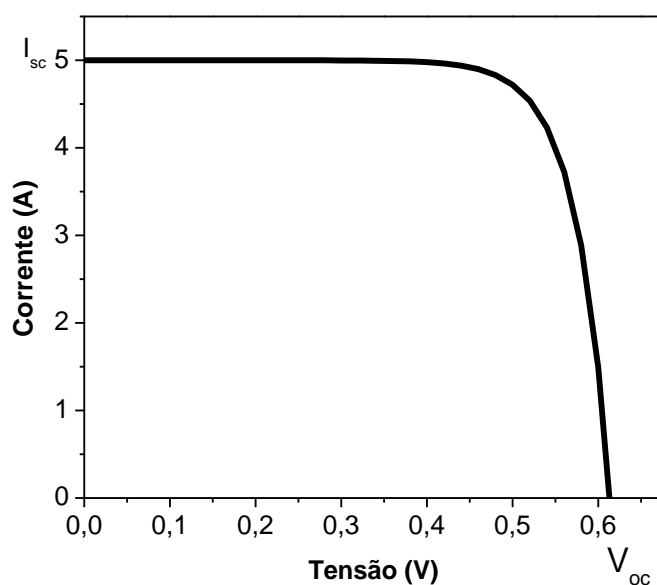


Figura 3.7 - Curva I-V da célula PV- Modelo simplificado

A curva I-V representada na Figura 3.7 representa a resposta do sistema do modelo simplificado e está dentro do esperado segundo os parâmetros fornecidos pelo fabricante nas condições de referência. Observa-se que quando para $V=0$ coincide com o máximo valor da corrente ($I_{sc} = 5A$), e que entre os 0,6-0,7 V (sendo que $V_{oc} = 0,614$), a corrente começa a diminuir o que coincide com a tensão em que o diodo começa a conduzir.

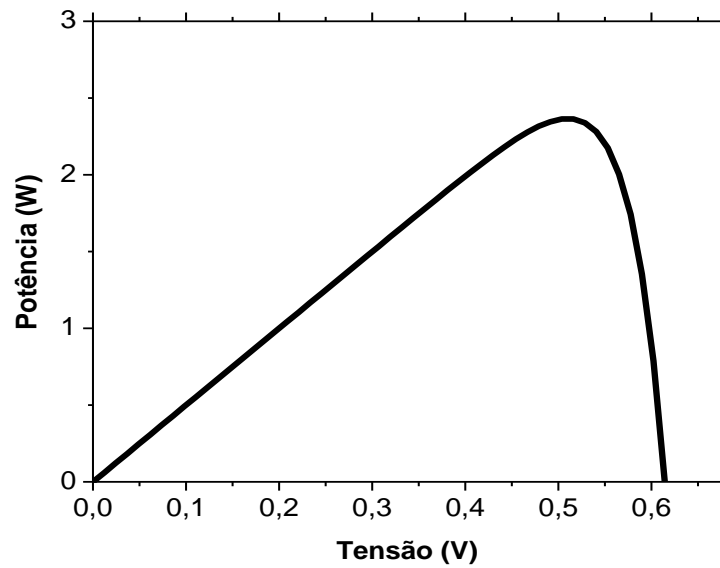


Figura 3.8 - Curva da Potência

Na figura 3.8 está representada a curva característica de potência da célula solar do modelo simplificado. A curva característica da potência é caracterizada por um aumento da potência a medida que aumenta a tensão na célula solar, até atingir o ponto máximo de potência onde começa a diminuir.

3.4.1.2 Máxima potência de saída (I_{\max} e V_{\max})

À máxima potência de saída corresponde a um I_{\max} e V_{\max} na respectiva curva I-V. Na Figura 3.6, foram acrescentados novos blocos no modelo simplificado da célula PV de modo a obter-se a curva P-V, e os valores de I_{\max} e V_{\max} . Os valores pretendidos são mostrados no bloco *display*.

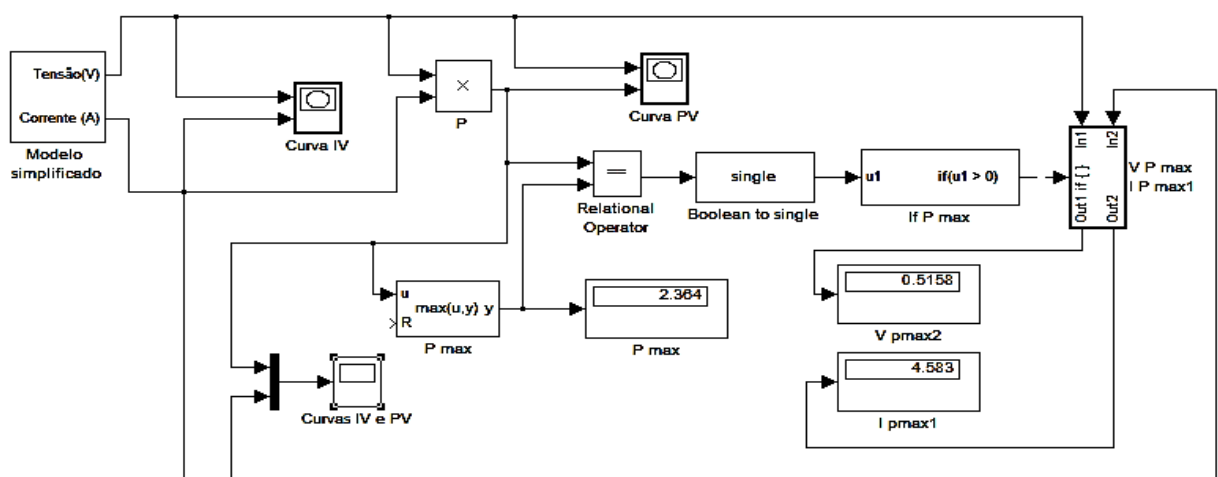


Figura 3.9 - Diagrama de blocos do modelo simplificado que inclui a determinação de I_{\max} e V_{\max}

Por uma questão de simplificação, o modelo apresentado na Figura 3.6 foi convertido num subsistema, ou seja está inserido no bloco *Modelo simplificado* na figura 3.9.

Para determinar o I_{\max} e o V_{\max} , começou-se por colocar o bloco *MinMax Running Resettable* da biblioteca *Math Operations* o qual determina o valor da potência máxima. Ao bloco *MinMax* foi acoplado a um *display* para posterior visualização do valor máximo da potência. Foi adicionado o bloco *Relational Operator* (“TRUE” quando os dois sinais de entrada forem iguais) com duas entradas de sinais: o primeiro sinal de entrada é referente aos valores da potência; o segundo é referente ao valor máximo da potência obtido pelo bloco *MinMax*. O bloco *Relational Operator* utiliza a álgebra booleana e vai comparando os valores dos sinais de entrada até a proposição ser verdadeira. Ao bloco foi acoplado o *Data Type conversion* para a respectiva conversão dos valores em booleano. Com os blocos adicionados pretende-se obter o valor máximo da potência, faltando apenas ler os valores de I_{\max} e V_{\max} neste mesmo ponto. Para o efeito foi adicionado o bloco *If* que implica o uso do bloco *if action subsystem* cuja execução da acção é activada pelo bloco *If*. A condição $u1 > 0$ no bloco *If* implica que quando a proposição for verdadeira ou seja se está no ponto de potência máxima e definindo as entradas de sinais do *If action subsystem*, os valores I e V neste instante são lidos e mostrados no *display*. Através dos valores dos *displays* da Figura 3.8 pode-se analisar a fiabilidade do modelo simplificado concebido no *Simulink*. Os valores de P_{\max} , I_{\max} e V_{\max} após a simulação vão de encontro aos valores fornecidos pelo fabricante das células PV (Tabela 3.1).

3.4.2 Modelo simplificado da célula real

O modelo simplificado da célula real é caracterizado por incluir as resistências equivalentes em série R_s e em paralelo R_p . Numa célula ideal R_s é aproximadamente zero e R_p é infinita.

3.4.2.1 Cálculo de R_s e R_p

As resistências equivalentes R_s e R_p são parâmetros eléctricos que podem ser determinados a partir de diferentes métodos [35], [36], [37]. Um dos métodos práticos para o cálculo de R_p , consiste em determinar na região de curto-circuito da curva característica I-V da célula, o inverso do declive da região linear [38].

Para se estimar a resistência equivalente paralela R_p representado na figura abaixo, pode-se considerar a região linear no intervalo entre 0 a 0.4 V da curva I-V da Figura 3.10.

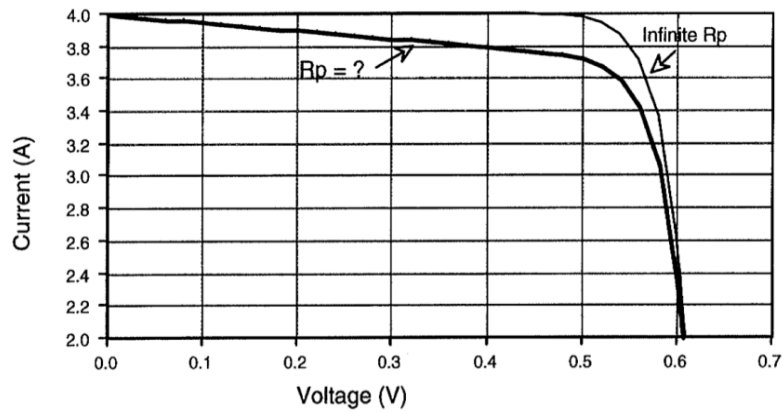


Figura 3.10 - Curva característica com influência da resistência [38]

Na figura observa-se a diferença entre uma curva característica sem o efeito da Resistência paralelo e uma outra curva I-V com um valor de R_p mais baixo. O cálculo desta resistência será:

$$R_p = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.4V - 0.0V}{4.0A - 3.8A} = \frac{0.4V}{0.2A} = 2\Omega \quad (3.30)$$

Analogamente para o cálculo da resistência equivalente R_s , utiliza-se o mesmo método só que o cálculo é feito na região de circuito-aberto ($I=0$, $V=V_{oc}$).

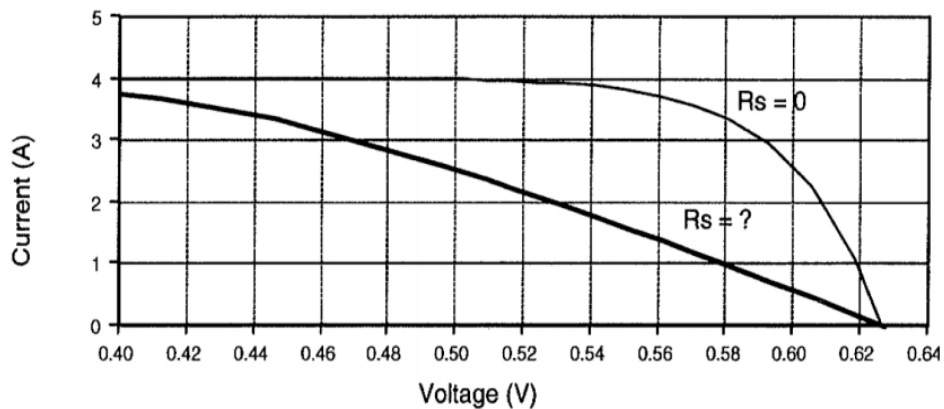


Figura 3.11 - Curva característica com influência da resistência R_s [38]

Considerando a região linear entre 0.62 V e 0.58 V e a respectiva corrente 0 A e 1 A tem-se:

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.04V}{1A} = 0.04\Omega \quad (3.31)$$

3.4.2.2 Implementação no *Simulink/Matlab*

Determinou-se os valores de R_p , R_s e Z e a partir do modelo simplificado e da equação (3.28) foi implementado no Simulink o modelo simplificado de duas resistências.

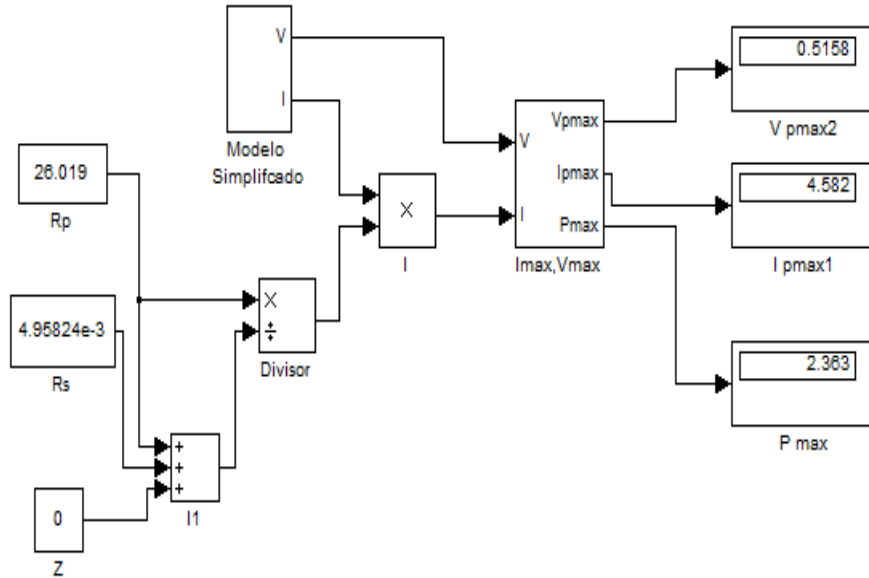


Figura 3.12 - Diagrama de blocos para o modelo simplificado da célula real: inclusão de duas resistências

O modelo foi concebido tendo como base o modelo teórico simplificado abordado anteriormente. Basicamente fez-se o produto deste modelo (Figura 3.6 – Diagrama de blocos do modelo simplificado utilizado no *Simulink/Matlab*) pelo quociente $\frac{R_p}{R_p + R_s + Z}$. No modelo ainda foi adicionado o bloco “Imax,Vmax” que permite calcular os valores da corrente e tensão no ponto de potência máxima e são apresentados após a simulação nos respectivos *displays*. Na simulação do modelo também se obtém as curvas características I-V e P-V da célula PV. Os gráficos são obtidos através dos blocos *XY Graph* que fazem parte do sistema “Modelo simplificado” cujos respectivos subsistemas são apresentados no Anexo A.

3.4.2.3 Obtenção das curvas I-V – Modelo simplificado da célula real

O gráfico da Figura 3.13 mostra as curvas obtidas através da simulação.

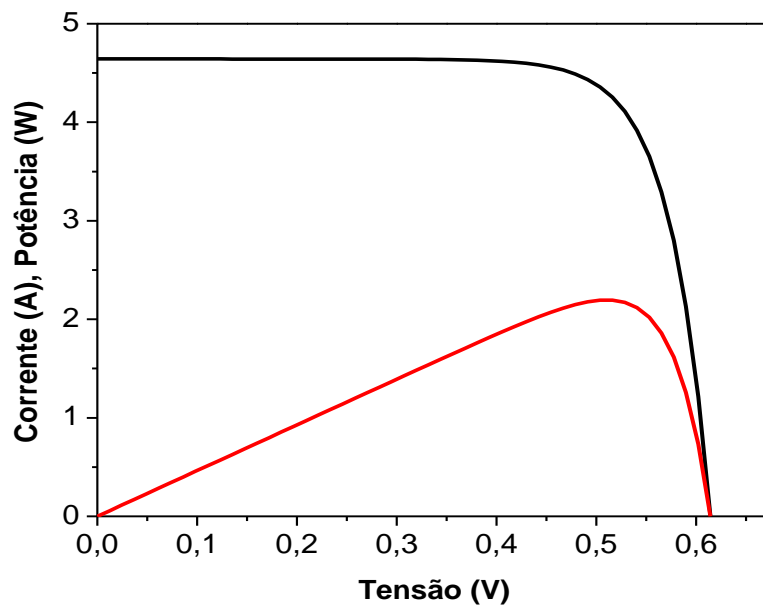


Figura 3.13 - Curvas I-V e P-V obtidas através do modelo da célula real

3.4.3 Modelo de dois díodos

Após a modelação dos dois modelos, resta implementar o modelo de dois díodos em Simulink/Matlab. A partir da equação (3.29) fez-se o modelo apresentado na figura abaixo.

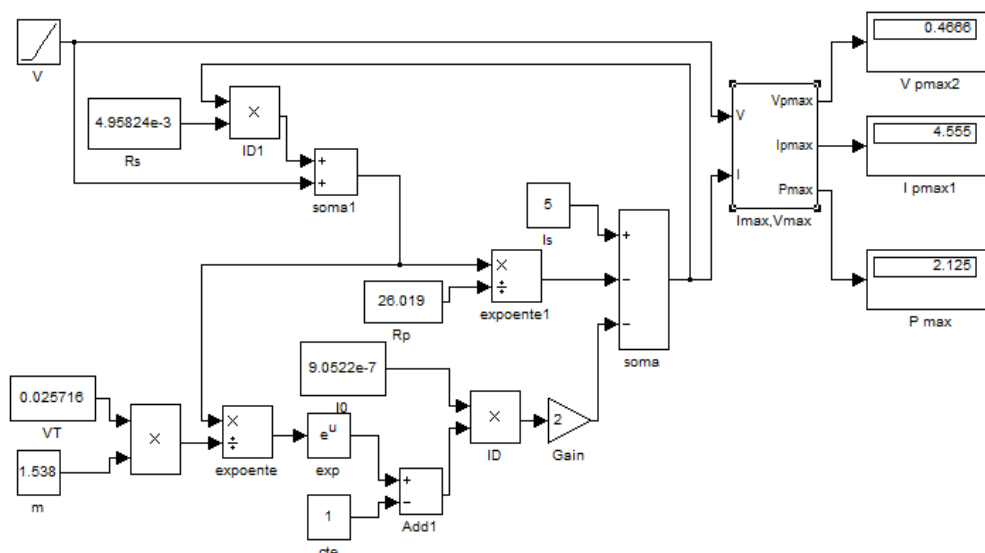


Figura 3.14 - Diagrama de blocos para o modelo de dois díodos

Da biblioteca “Math Operations” do Simulink adicionou-se à interface de modelação o bloco soma para modelar as parcelas presentes da equação 3.29. Na figura acima é possível observar o

bloco “*Gain*”, que faz a multiplicação das duas parcelas referentes aos díodos presentes no circuito do modelo de dois díodos. Similar ao apresentado nos modelos anteriores, incluiu-se o bloco “ I_{\max} , V_{\max} ” para a determinação dos valores no ponto de potência máxima, acoplado com os respectivos *displays* para a visualização da corrente (I_{\max}), tensão (V_{\max}) e P_{\max} .

3.4.4 Comparação dos modelos desenvolvidos em Simulink

Na tabela 3.2 apresentam-se os resultados obtidos para a célula através da simulação com cada um dos modelos desenvolvidos.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos através dos diferentes modelos

Modelos desenvolvidos no Simulink	Parâmetros no ponto de potência máxima		
	$I_{p\max}$ (A)	$V_{p\max}$ (A)	P_{\max} (A)
Célula teste	4.72	0.5	2.36
Modelo Simplificado	4.628	0.5113	2.366
Modelo de duas Resistências	4.297	0.5113	2.197
Modelo de dois díodos	4.555	0.466	2.125

O resultado da simulação demonstra que os parâmetros do modelo simplificado são os que apresentam valores mais próximos dos fornecidos pelo fabricante da célula em estudo. O modelo de dois díodos é o que apresenta a potência máxima com o valor mais baixo. Os valores obtidos da simulação foram exportados para a área de trabalho do *Matlab* e posteriormente tratados para obtenção das curvas características I-V e P-V de cada um dos modelos. O diagrama de blocos utilizado na simulação da comparação dos modelos propostos será apresentado em anexo.

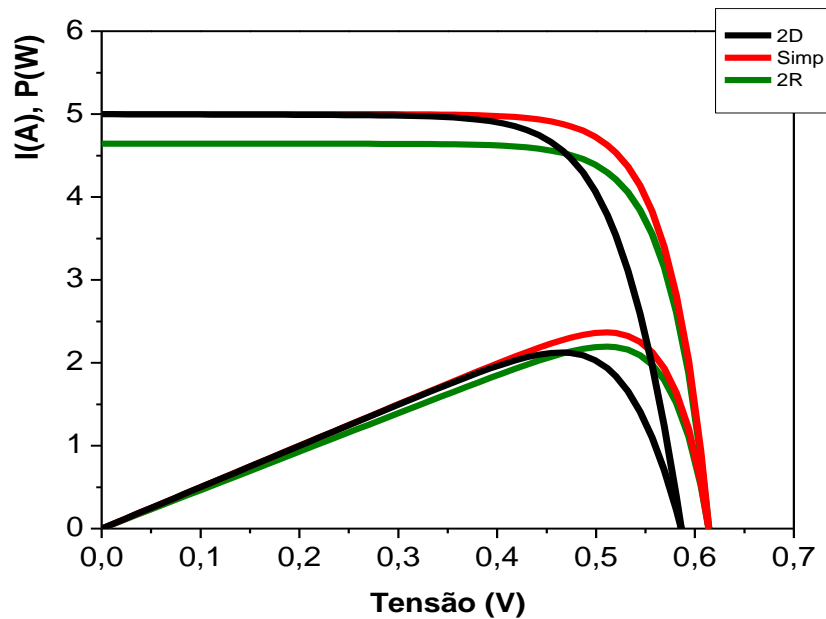


Figura 3.15 - Curva I-V e PV dos três modelos

Tomando como referência o modelo simplificado, é possível observar na Figura 3.15 que o modelo de duas resistências é caracterizado pela diminuição do I_{\max} , sendo que a tensão de circuito aberto V_{oc} praticamente não se altera. Tanto no gráfico da P-V ou I-V é visível a diminuição do I_{sc} e do I_{\max} .

O comportamento do modelo de dois díodos é o inverso, sendo que a corrente mantém-se praticamente inalterada e há uma diminuição da tensão de circuito aberto demonstrado pela deslocação I-V e P-V para a esquerda.

3.5 Modificação do modelo matemático da célula Fotovoltaica para estudar a influência da temperatura no comportamento da célula Fotovoltaica

O modelo simplificado desenvolvido a partir da equação (3.4) foi modificado para incluir a influência da temperatura. O modelo apresentado é assim mais complexo sendo no entanto capaz de reproduzir a curva I-V introduzindo apenas os dados fornecidos pelo fabricante. Manteve-se a tensão (V) como sinal de entrada (rampa unitária) com o objectivo de se obter a curva I-V que é a resposta pretendida para o sistema. Uma das entradas do modelo é a variável T que representa a temperatura da célula.

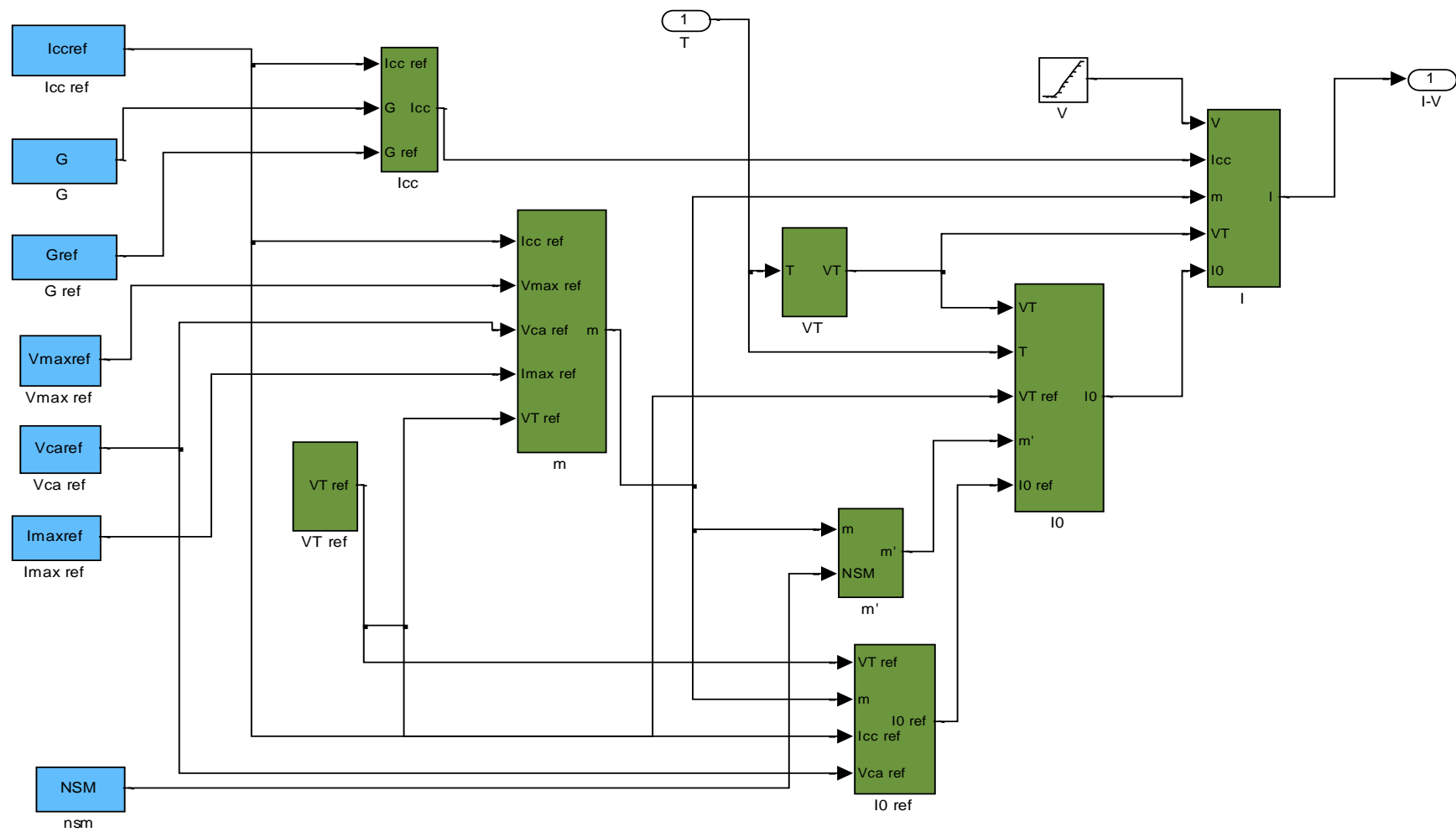


Figura 3.16 - Diagrama de blocos do modelo modificado com influência da temperatura

Com o objectivo de verificar a influência da temperatura da célula no seu desempenho fez-se variar a variável T. Deste modo obtiveram-se as curvas características I-V referentes a cada uma das temperaturas.

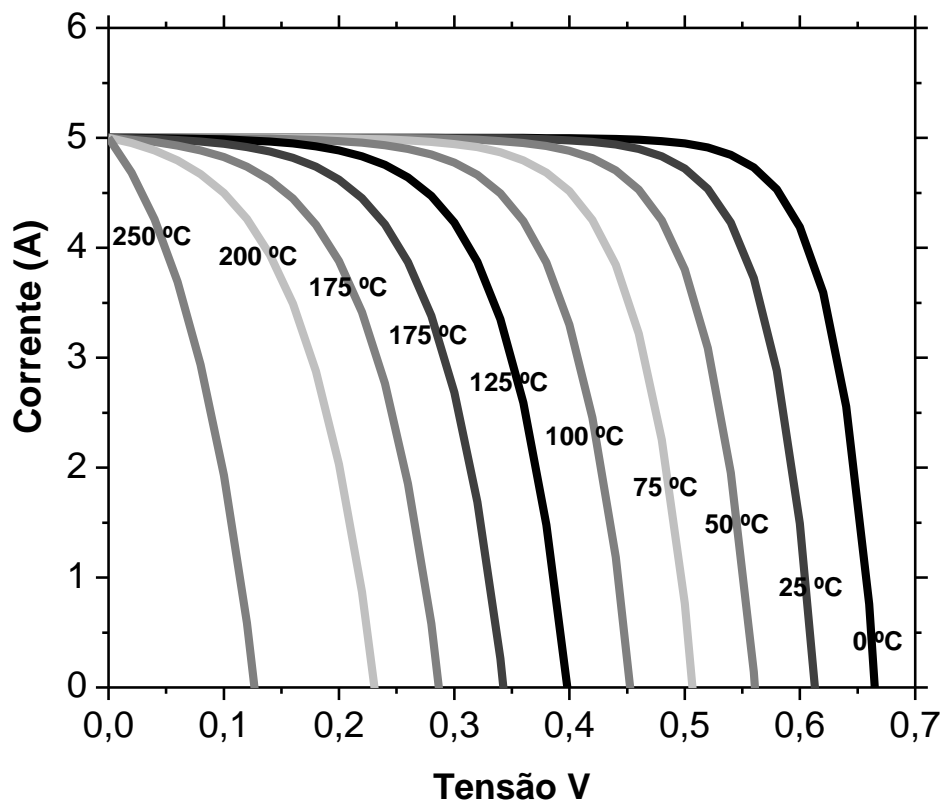


Figura 3.17 - Curva I-V em função da temperatura da célula

A temperatura da célula é uma variável que influencia de uma maneira determinante o funcionamento da célula fotovoltaica. De uma forma geral podemos afirmar que a eficiência da célula solar aumenta com o aumento da radiação mas diminui com o aumento da temperatura das células. A simulação do modelo modificado foi realizada de acordo com os parâmetros da Tabela 3.1. O resultado da simulação ilustra a variação da curva I-V de células fotovoltaicas expostas a uma radiação constante com temperaturas variáveis. A radiação utilizada no modelo matemático foi de 1000 W/m^2 .

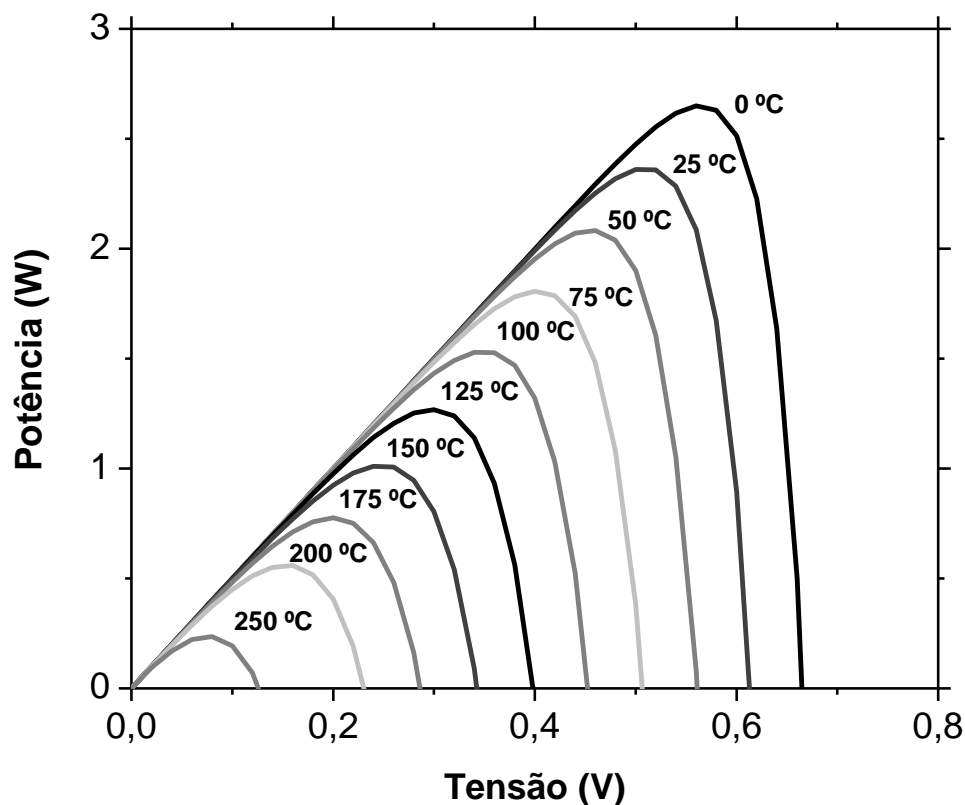


Figura 3.18 - Influência da temperatura na Curva P-V

O aumento da temperatura nas células fotovoltaicas é directamente proporcional à redução da tensão sendo que a potência da célula decresce (Figura 3.18), a tensão em vazio, V_{oc} , decresce, a variação da corrente de curto-circuito, I_{cc} , é praticamente desprezável e há variação da corrente inversa de saturação, I_0 .

3.5.1 Radiação incidente

A radiação incidente, para o estudo no âmbito desta dissertação, foi simulada pelos projectores de lâmpadas de halogéneo. No estudo a influência da temperatura no funcionamento da célula, a variável referente à radiação incidente mante-se constante, variando apenas a temperatura. Para se verificar o efeito da radiação solar incidente na célula, utilizou-se o mesmo modelo desenvolvido em *simulink* em que neste caso a temperatura da célula é uma constante a 25°C, variando apenas a radiação incidente.

De acordo com a referência [39], quando aumenta a radiação solar incidente, na célula, a:

- a tensão em vazio, V_{oc} , varia muito pouco (desprezável);
- a potência de saída da célula aumenta;

- a corrente de curto-circuito, I_{cc} , varia linearmente;
- a corrente inversa de saturação, I_0 , varia.

A influência da radiação solar incidente no modelo modificado, está directamente relacionado com a equação (3.25).

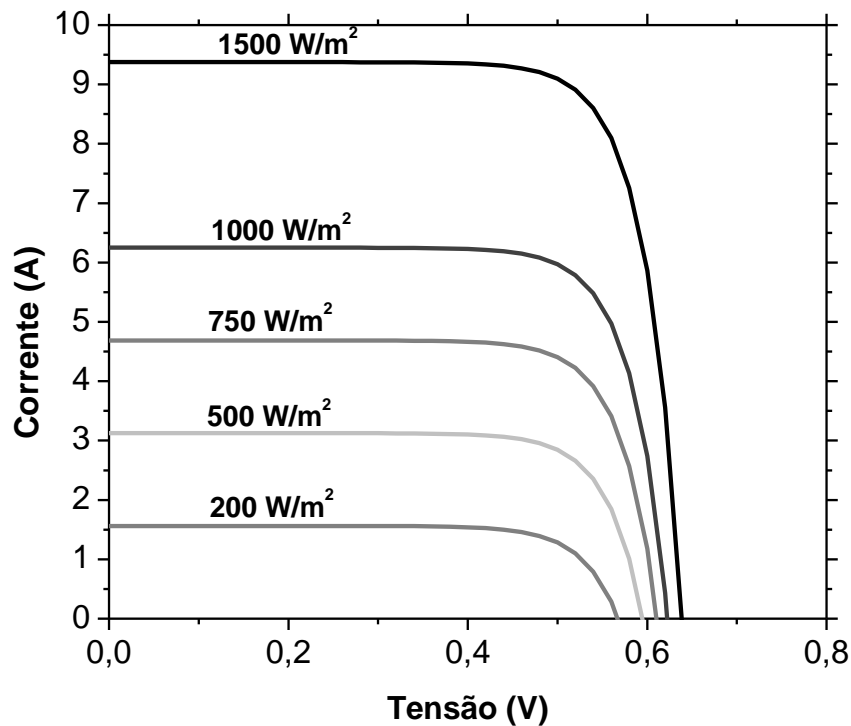


Figura 3.19 - Influência da radiação solar na curva I-V da célula solar

A variação na curva I-V devido à radiação solar é notória na figura 3.19. A corrente diminui proporcionalmente com a diminuição da intensidade da radiação incidente. A variação da tensão é muito menor sobretudo para valores de potência incidente maiores.

4

Optimização de Células Fotovoltaicas

Neste capítulo será feita uma análise e descrição da montagem experimental feita para se estudar o efeito da temperatura no rendimento das células fotovoltaicas. A descrição experimental assim como os sistemas de arrefecimento utilizados serão também abordados ao longo deste capítulo.

4.1 Descrição da Montagem Experimental

Com o objectivo de se estudar o efeito da temperatura nas células fotovoltaicas, fez-se uma montagem para a realização dos ensaios. A montagem é constituída por um suporte para se colocar as células fotovoltaicas e dois projectores de lâmpadas de halogéneo que simulam a radiação solar. O suporte para as células PV foi desenhado para se ensaiar dois sistemas distintos de arrefecimento para duas células fotovoltaicas ligadas em série entre si. Foi construído em madeira (devido às propriedades isolantes) e sua superfície pintada com tinta anti-reflectora preta. O suporte tem as dimensões 55,5 x 20 cm.



Figura 4.1 – Montagem experimental para o estudo do efeito da temperatura nas células PV.

Para se simular a radiação solar, foram utilizados dois projectores de 330 W cada. Os dois projectores foram utilizados para que a radiação fosse uniforme ao longo da área das células. Com apenas um projector havia um gradiente térmico enorme ao longo das células. Os projectores estavam colocados a uma distância de 34 cm da bancada de ensaio das células, com uma radiação média ao longo da área das duas células de aproximadamente 800 W/m^2 .

4.1.1 A Célula solar

Os ensaios foram realizados sempre com duas células PV policristalinas colocadas em simultâneo no suporte. As células estavam ligadas em série entre si e alimentavam uma carga pré-dimensionada para se operar no MPP²¹.

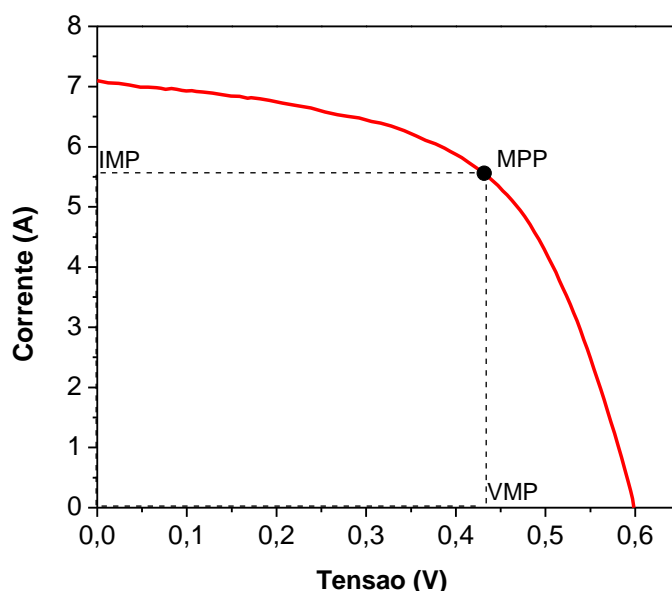


Figura 4.2 - Curva característica da célula solar utilizada.

A curva característica de uma das células fotovoltaicas policristalinas, obtida através do simulador solar *SPI-Sum Simulator 240A* é apresentada no gráfico da Figura 4.2. O MPP é o valor máximo de potência entregue pela célula fotovoltaica e corresponde ao ponto da curva ao qual o produto $V \times I$ é máximo. Para se operar no ponto máximo de potência, determinou-se a resistência de carga $0,14 \Omega$. A corrente e a tensão em que célula fotovoltaica opera são determinadas pela radiação solar incidente, pela temperatura e pelas características da carga conectada à célula.

²¹ Peak Power ou Maximum Power Point

Tabela 4.1 - Valores da simulação da célula

IMP (A)	VMP (V)	MPP (W)
5,56	0,43	2,39

4.1.2 Sistemas de aquisição de dados

Dos ensaios foram recolhidos os valores da tensão, corrente, a temperatura das células fotovoltaicas como também a temperatura da água utilizada para arrefecer as células. A temperatura das células fotovoltaicas foi obtida e processada pelo computador através dos dados câmara térmica FLIR A300/A310, e os valores da corrente e da tensão, foram obtidos a partir de um multímetro digital. A radiação foi determinada através do radiómetro IL1700.

4.1.2.1 Multímetro digital

Os valores da corrente e da tensão das células foram recolhidos utilizando o multímetro digital que através de um cabo de fibra óptica permitia ter a leitura dos mesmos valores de minuto a minuto no computador. O multímetro digital estava ligado aos terminais das células fotovoltaicas para se obter os valores da tensão. Para se obter a corrente ligou-se o multímetro também à carga resistiva.

4.1.2.2 Radiómetro

Para se medir a radiação que se incide directamente na célula foi utilizado o radiómetro IL1700. Como a radiação devido aos projectores não é uniforme ao longo da área das células, vários ensaios foram realizados a fim de se conseguir uma radiação aproximada às condições STC²². Para se obter uma radiação próxima das condições STC tem-se o risco de a radiação dos projectores aquecer células, influenciando assim o estudo, pois para se conseguir essa radiação, os projectores tinham que ficar a uma distância próxima das células. Para evitar o aquecimento das células devido à acção da radiação dos projectores, estes foram colocados a uma altura de 34 cm em relação ao suporte das células, com uma radiação aproximadamente de 800 W/m².

4.1.2.3 Termopar

A medição da temperatura das células constitui uma das etapas mais importantes na realização dos ensaios. No caso de sistemas fotovoltaicos quanto maior a temperatura das células pior é o desempenho. A temperatura é considerada um indicador da energia cinética molecular média de um corpo (apenas a energia cinética de translação contribui para a grandeza da temperatura). A

²² Standard Test Conditions - As condições STC representam o *standard* mais usual na indústria e são usados para classificar e comparar células PV

medição da temperatura é feita através de vários tipos de instrumentos. Os dispositivos mais comuns para a medição da temperatura são:

- Termómetros de dilatação;
- Termómetros bimetalícos;
- Termopares;
- Termómetros de resistências (RTD);
- Termómetros de radiação infravermelha e visível;

Para a medição da temperatura da água utilizada para o arrefecimento das células PV expostas à radiação dos projectores recorreu-se ao uso de um termopar do tipo K. Os termopares são os sensores de temperatura mais usados e simples para medir a temperatura. São constituídos por dois materiais diferentes ligados entre si, condutores ou semicondutores. As duas junções de dois metais distintos formam um circuito fechado e quando submetidos a temperatura diferentes geram uma força electromotriz, designada tensão de *Seebeck*.

4.2 Exposição das células PV à radiação dos projectores

A primeira fase das experiências consiste em expor as células PV à radiação dos projectores sem nenhum sistema de arrefecimento adicionado à montagem. Estas experiências serão a referência para após os ensaios em que os sistemas de arrefecimento serão adicionados à montagem. No suporte das células fotovoltaicas, Figura 4.3, foram colocadas as duas células PV ligadas em série entre si.

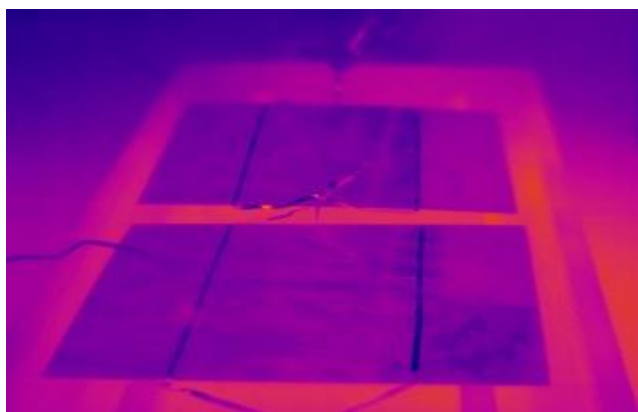


Figura 4.3- Células fotovoltaicas no suporte

A câmara térmica e o multímetro digital foram ligados ao computador para a recolha dos valores da temperatura, corrente e tensão nas células fotovoltaicas. De modo a minimizar os erros nas experiências em relação à temperatura das células, a câmara térmica foi calibrada e

desta forma todas as experiências decorreram sob as mesmas condições apresentadas na tabela Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros da câmara térmica

Parâmetros	
Emissividade	0,95
Distância	30 Cm
Temperatura reflectida	25,2 °C
Temperatura ambiente	25 °C
Humidade relativa	50 %

4.2.1 Temperatura ambiente, distância e humidade relativa

A temperatura ambiente, distância e humidade relativa são utilizados com o objectivo de compensar a radiação que é absorvida na atmosfera entre o objecto a analisar e a câmara térmica, como também pela diminuição da transmitância com a distância. A transmitância é fortemente influenciada pela humidade do ar. Para se conseguir uma boa medição da temperatura na amostra e para distâncias curtas como é o caso das experiências a realizar, irá utilizar-se a humidade relativa padrão de 50%. A temperatura ambiente introduzida como parâmetro da câmara térmica foi de 25°C. Verificou-se que a temperatura ambiente da sala é desprezável quando comparado com o aumento da temperatura das células devido à radiação dos projectores de lâmpadas de halogéneo.

A distância é a distância entre a amostra e a lente da câmara térmica. Teve-se sempre a preocupação de se colocar a objectiva da câmara térmica a uma distância a 30 cm da superfície a analisar e com a mesma inclinação angular. Não foi possível colocar a câmara térmica mais próxima do objecto a analisar, pois corria-se o risco de danificar a lente objectiva da câmara térmica com o aumento da temperatura ao longo das experiências. A esta distância foi possível obter uma imagem nítida e precaver o risco de danificar as lentes sensíveis da câmara térmica.

4.2.2 Emissividade

Um dos parâmetros mais importantes no funcionamento da câmara térmica é a emissividade. A emissividade de um material é determinada através da quantidade da radiação que é emitida pela superfície do material, comparado com a radiação que é emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade pode variar entre os valores 0 a 1, sendo que uma superfície bem

polida (espelho) tem emissividade menor que 0,1 e uma superfície oxidada ou pintada tem uma emissividade maior. Na maioria das indústrias são utilizadas emissividades padronizadas (normalmente fixas em 0,95) para medição em diversos materiais e metais. A pele humana apresenta uma emissividade de 0,97-0,98.

Para as células fotovoltaicas utilizadas nas experiências o valor da emissividade foi de 0,95 (conforme a tabela em cima apresentada) para todas as experiências realizadas, deste modo irá focar-se a evolução da temperatura e potência das células ao longo do tempo.

4.2.3 Temperatura reflectida

A fim de otimizar a precisão da temperatura da superfície das células fotovoltaicas foi determinada a temperatura reflectida aparente nas células através das reflexões de outras fontes nas células. A temperatura reflectida aparente ou temperatura reflectida é uma correcção que é feita caso se queira fazer uma análise exacta da superfície a analisar, torna-se menos influente para casos em que a emissividade do material é elevada. Este parâmetro faz uma correcção entre a temperatura que é reflectida devido ao “*thermal background*”²³ e a temperatura real da superfície da amostra a analisar, permitindo assim obter uma medição mais precisa da temperatura da superfície a analisar.

²³ Thermal background – termo utilizado na termografia para descrever reflexões na área da amostra na medição da temperatura.

4.2.4 Obtenção dos valores corrente e tensão nas células

Com o multímetro digital ligado aos terminais das células (ligadas em série) e acoplado a uma resistência pré-dimensionada para o estudo e com a câmara térmica calibrada de acordo com a Tabela 4.2, ligou-se os projectores de lâmpadas de halogéneo para se simular a radiação solar e procedeu-se à obtenção dos valores da corrente e tensão nas células PV pré-colocadas no suporte de madeira.

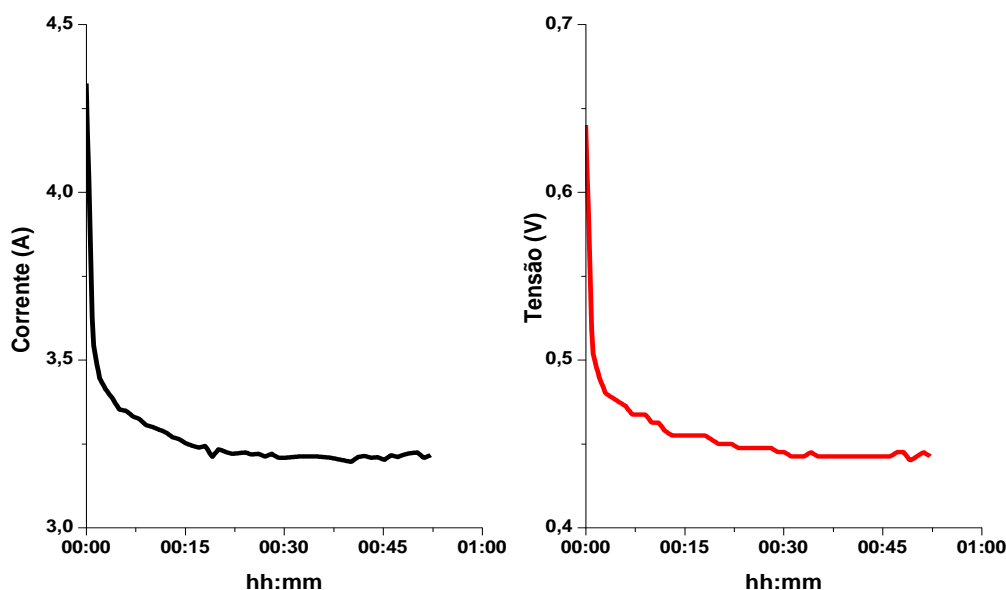


Figura 4.4 - Curvas dos valores da corrente e da tensão nas células ao longo do tempo de exposição

No gráfico acima é possível observar o comportamento da variação da corrente e da tensão nas células ao longo do tempo de exposição à radiação, do início ao fim da experiência (desligar os projectores). Ao iniciar a experiência, logo após ligar os projectores, temos os valores máximos da corrente (I) e tensão (V) nas células fotovoltaicas. À medida que o tempo de exposição vai aumentando há uma diminuição da corrente e da tensão. Com um tempo de exposição de 57 min e a radiação estimada entre os 800 W/m^2 , é possível verificar pelos gráficos acima representados, que a diminuição dos valores da corrente e da tensão é mais acentuada nos primeiros minutos após ligar os projectores. No gráfico da corrente é possível observar que em 1 minuto, o valor da corrente baixa de 4,3A para 3,5A. Após essa diminuição inicial, os valores da corrente continuam a descer até estabilizar nos 3,2A aproximadamente. A tensão inicial é de 0,64 V diminuindo para 0,49 V em 1 minuto e estabiliza ao fim dos 22min nos 0,44V até o final da experiência.

4.2.5 Potência das células

A partir dos valores da corrente (I) e da tensão (V) obtém-se valores da potência (P em W), através da seguinte fórmula:

$$P = V \times I \text{ (W)} \quad (4.1)$$

A partir dos valores dos gráficos da Figura 4.4, obteve-se a evolução da potência das células durante o tempo em que estiveram expostas à radiação.

No gráfico da Figura 4.5 mostra-se a evolução da potência ao longo do tempo de exposição.

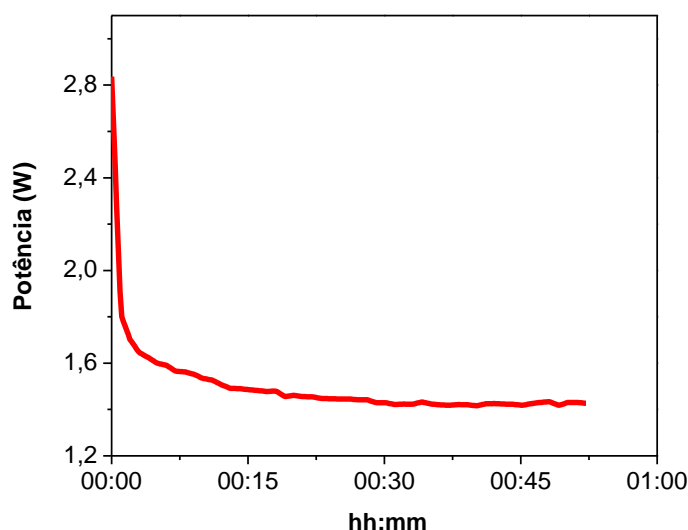


Figura 4.5 - Gráfico da potência ao longo do tempo de exposição

Durante o mesmo tempo de exposição, é possível verificar na Figura 4.5 que a curva da potência das células têm o mesmo comportamento dos gráficos apresentados na Figura 4.4, como era de se esperar. A potência atinge o valor máximo no momento em que se ligam os projectores 2,8 W, sendo que em apenas 1 min de exposição à radiação (simulação feita através dos projectores de halogéneo), a potência apresenta uma quebra de aproximadamente 40%, baixando significativamente para os 1,7 W. A curva da potência continua a sua trajetória descendente até estabilizar aproximadamente nos 1,45 W.

4.2.6 Efeito da temperatura e da radiação incidente nas células

As medidas apresentadas anteriormente foram obtidas sem qualquer refrigeração das células e portanto simulam o que acontece à potência de saída em funcionamento normal. De modo a avaliar a evolução da temperatura da célula com a exposição à luz esta foi monitorizada reproduzindo o ensaio anterior.

4.2.7 Obtenção dos valores da temperatura das células

No gráfico da Figura 4.6 é demonstrado a variação da temperatura das células quando expostas à radiação dos projectores.

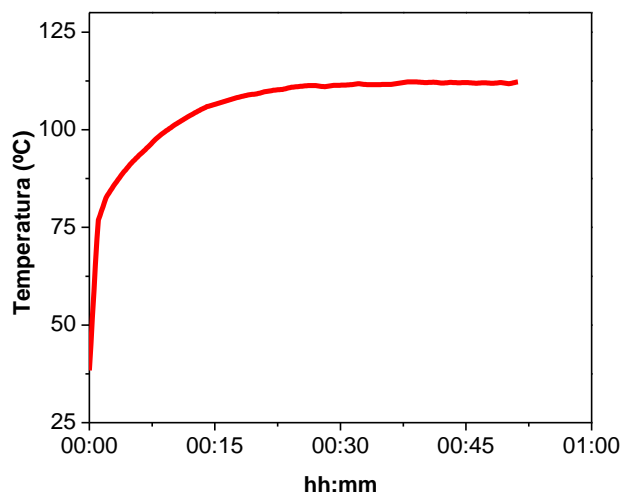


Figura 4.6 – Variação da temperatura das células quando expostas à radiação

No primeiro minuto após se ligarem os projectores é possível constatar que a temperatura das células aumenta aproximadamente 39 °C, apenas em 1 minuto. A temperatura das células continua a aumentar até estabilizar entre (110 – 112) °C, ou seja temos um aumento de temperatura nas células de cerca de 74 °C do início da exposição à radiação até se desligarem os projectores.

4.2.7.1 Influência da temperatura das células na potência

Foi possível observar nos subcapítulos anteriores a variação da corrente, tensão e potência ao longo do tempo de exposição da radiação dos projectores. Admitindo uma radiação constante, resta-nos observar e analisar a influência do aumento da temperatura das células.

À medida que a temperatura das células aumenta é possível verificar pelo gráfico da Figura 4.7 que a potência das células diminui.

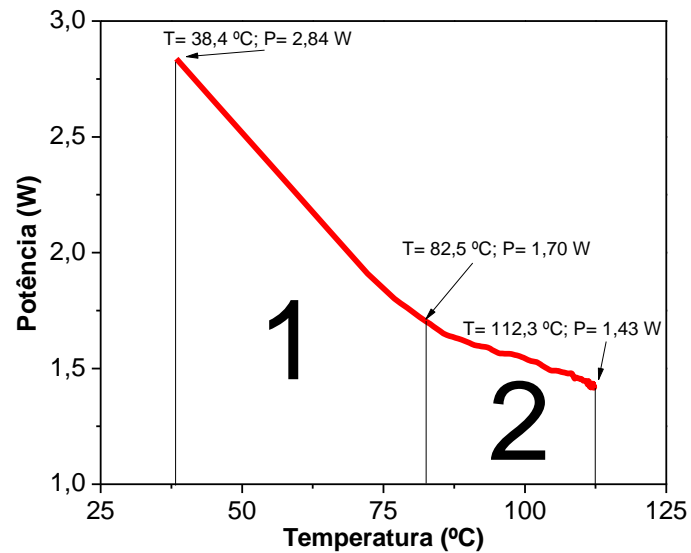


Figura 4.7- Variação da potência com a temperatura das células

O valor máximo da potência regista-se no início do ensaio, que corresponde à temperatura mínima das células. Verifica-se que com o aumento da temperatura das células em aproximadamente 2 min (Figura 4.5), a potência diminui de 2,84 W para 1,65 W na região 1 do gráfico. Na região 2 regista-se uma diminuição mais gradual da potência até atingir o valor mais baixo da potência 1,43 W.

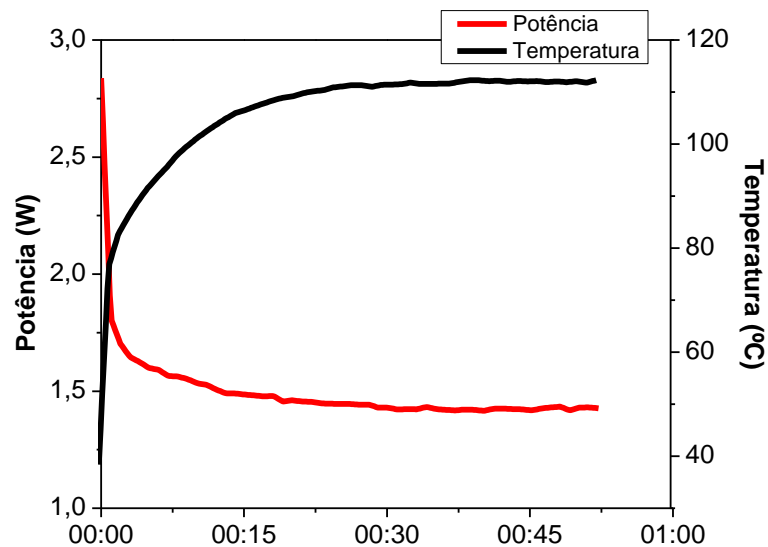


Figura 4.8 - Variação da potência e da temperatura ao longo do tempo

Após ligar os projectores e nos primeiros minutos no decorrer da experiência, a temperatura das células aumenta bruscamente e devido a este aumento a potência diminui de uma forma inversa.

4.3 Refrigeração das células por ventilação

Ao sistema desenvolvido para a realização dos ensaios anteriores, foi adicionado uma ventoinha (*cooler* dos computadores), de modo a arrefecer as células fotovoltaicas. Foi utilizado um *cooler* com as dimensões 120x120x25 mm. Mais especificações técnicas do *cooler* adicionado ao sistema estão descritas na Tabela 4.3 de acordo com o fabricante.

Tabela 4.3 - Especificação técnica do cooler ²⁴

Modelo	Marca	Tensão (Vac)	Frequência (Hz)	Corrente (Amp)	Potência (Watts)	Velocidade (RPM)	Fluxo (CFM)
DP201AT	SUNON	220-240	50/60	0.10/0.09	19/19	2000/2300	64/78

O cooler foi acoplado ao sistema de modo que o fluxo de ar fosse direccionado directamente para as células. Nos ensaios em que se utilizou a ventilação, as duas células foram sempre colocadas de forma a ficarem mais próximas uma da outra, para que o fluxo de ar fosse uniforme para as duas células a ensaiar.



Figura 4.9 - Suporte com o cooler

O suporte das células com o cooler instalado, para o arrefecimento das células fotovoltaicas é mostrado na Figura 4.9, com o fluxo de ar direccionado para cima (sentido das células fotovoltaicas). As experiências realizaram-se sob as mesmas condições referidas anteriormente (Tabela 4.2).

²⁴ <http://www.sunon.com.tw/products/pdf/ACFAN/DP12025.pdf>

4.3.1 Obtenção dos valores da corrente e tensão nas células

Procedeu-se à recolha dos valores de tensão (V) e corrente (I) de acordo com o procedimento referido anteriormente, com o cooler a arrefecer as células.

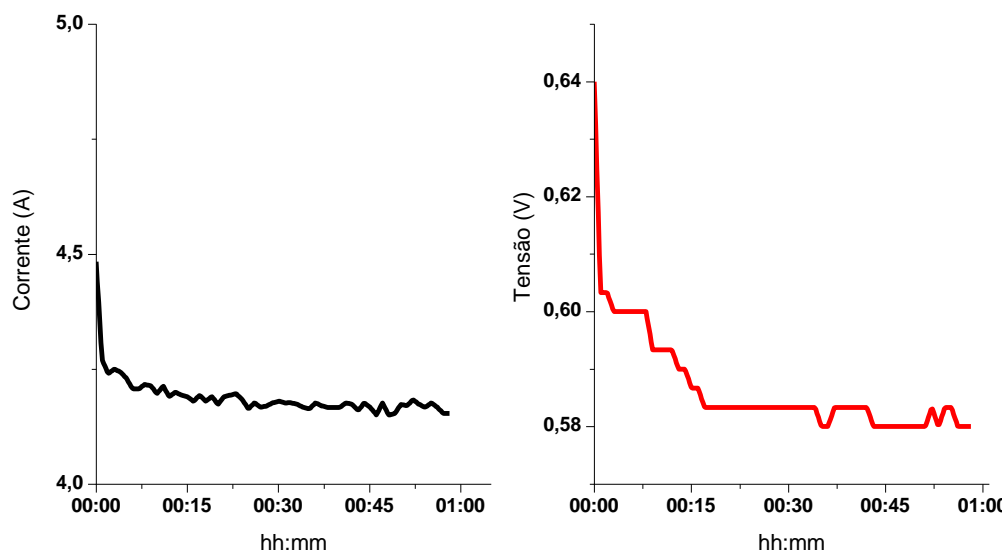


Figura 4.10 - Gráfico dos valores da corrente e da tensão nas células

Os valores obtidos estão representados nos gráficos da Figura 4.10. Embora as curvas apresentem um comportamento semelhantes às da Figura 4.4 é visível que a corrente sofre uma menor diminuição. A corrente durante um tempo de exposição à radiação de aproximadamente 58 min sofre uma diminuição dos 4,48 A (máximo da corrente no início da experiência) para os 4,15 A. A diminuição quer da corrente ou da tensão é mais acentuada nos primeiros 5 e 7 minutos respectivamente da exposição à radiação, com pequenas oscilações nos valores de ambos até o final da experiência. Com um fluxo de ar constante devido ao cooler verifica-se pelo gráfico da Figura 4.10 que a tensão inicial de 0,64 V diminui rapidamente nos primeiros 5 minutos iniciais e estabiliza-se a partir dos 15 min mantendo-se praticamente constante até ao final da experiência em que atinge o mínimo aos 0,58 V. Com uma radiação constante e apenas com o aumento da temperatura das células ao longo do tempo, a variação dos valores da tensão é mais significativa do que os valores da corrente.

4.3.2 Variação da potência das células refrigeradas com ventilação

Similarmente ao referido no ponto 4.2 na Figura 4.8, apresenta-se a variação da potência ao longo da exposição à radiação, sendo a célula refrigerada com um fluxo de ar fornecido pelo cooler.

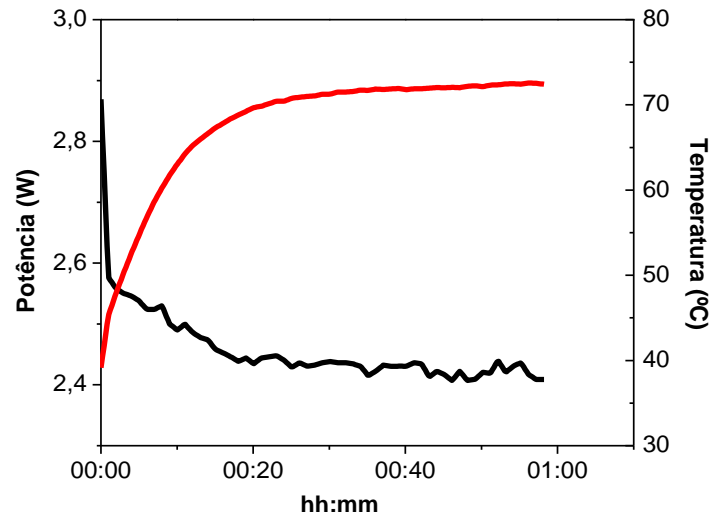


Figura 4.11 - Gráfico da potência em função do tempo: célula ventilada

A curva da potência é caracterizada por uma diminuição brusca da potência no início da experiência que estabiliza a partir dos 20 minutos de exposição à radiação. A potência tem o seu máximo no primeiro minuto logo após se ligarem os projectores de halogénio de 2,86 W. Após o primeiro minuto em que as células são expostas há uma diminuição da potência para os 2,57 W. A potência continua a diminuir e a partir dos 20 minutos tende a manter-se nos 2,43 W. Há diminuição considerável nos valores da temperatura das células. Com o cooler em funcionamento durante o tempo em que as células são expostas à radiação as células em estudo atingem no máximo uma temperatura de 72,6°C. O aumento da temperatura das células como era de esperar é mais lenta devido ao cooler. Com a inclusão do cooler constatou-se que comparativamente à situação anterior, em que não se utilizou nenhum mecanismo para o arrefecimento das células, os valores da potência são superiores.

4.4 Arrefecimento do sistema utilizando água como líquido refrigerador

Com o objectivo de diminuir a temperatura atingida pelas células foi construído um sistema para absorver o calor das células. Foram utilizadas duas placas de cobre com as mesmas dimensões das células. Debaxo das placas foram soldados tubos por onde a água circulará.



Figura 4.12 - Fotografia do sistema de refrigeração realizado: serpentina de cobre

Na Figura 4.12 está exemplificado a serpentina de cobre utilizada para a realização das experiências. A serpentina de cobre é colocada no suporte de madeira para as células. Entre a serpentina de cobre e as células foi colocado um isolante, neste caso o vidro de modo a não haver curto-circuito com as células.

Foram utilizados dois garrafões comuns de cinco litros cada, um no início para injectar água na serpentina e outro no fim que servia como reservatório final. O garrafão que injectava água na serpentina ficava sempre a uma altura de 1m do reservatório final. A água, inicialmente á temperatura ambiente, circulava pela serpentina devido à diferença de altura existente entre os dois garrafões. Em média a transferência dos cinco litros de água de um reservatório para o outro através da serpentina demora aproximadamente 2min:15s, num circuito fechado.

A introdução da serpentina de cobre tinha como objectivo arrefecer as células fotovoltaicas bem como verificar se a temperatura da água utilizada para o arrefecimento das células, aumentava de forma suficiente para se reutilizar para outros fins.

4.4.1 Obtenção dos valores da corrente e da tensão

Utilizando a câmara térmica para determinar a temperatura das células fotovoltaicas e o multímetro digital para a recolha dos valores da corrente e da tensão, utilizou-se um termopar para se recolher os valores da temperatura da água. Os valores foram anotados manualmente de minuto a minuto em sincronia com a câmara térmica e o multímetro digital. No gráfico que se

segue são apresentados os valores da tensão e da corrente das células fotovoltaicas quando expostas à radiação dos projectores de halogéneo e arrefecidas pelo sistema serpentina e água.

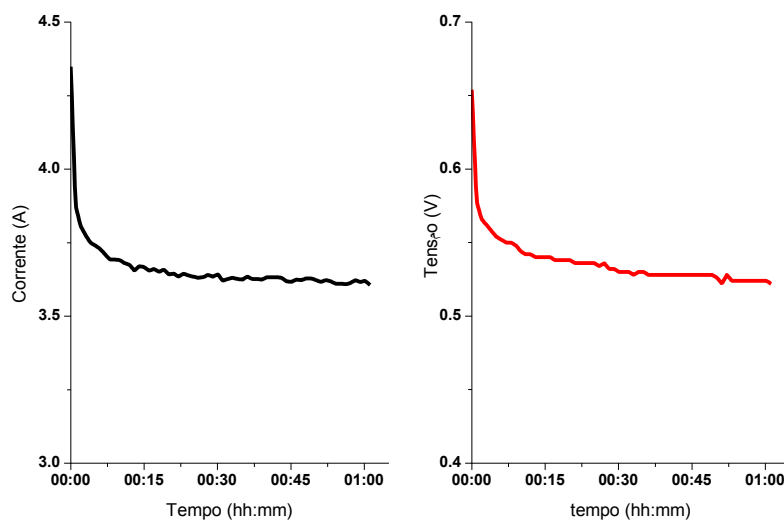


Figura 4.13 - Valores da tensão e corrente das células

No gráfico representado na Figura 4.13, apresentam-se os valores da corrente e da tensão obtidos. Na tabela abaixo é apresentado os valores máximos e mínimos da corrente e da tensão.

Tabela 4.4 - Valores máximos e mínimos da corrente e da tensão

	Corrente (A)	Tensão (V)
Valor máximo	4,35	0,65
Valor Mínimo	3,61	0,52

4.4.2 Potência das células

Com o sistema de serpentina e água, é possível observar um aumento dos valores máximos e mínimos da potência em relação à exposição das células fotovoltaicas sem nenhum sistema de refrigeração. Este aumento é devido à diminuição da temperatura das células.

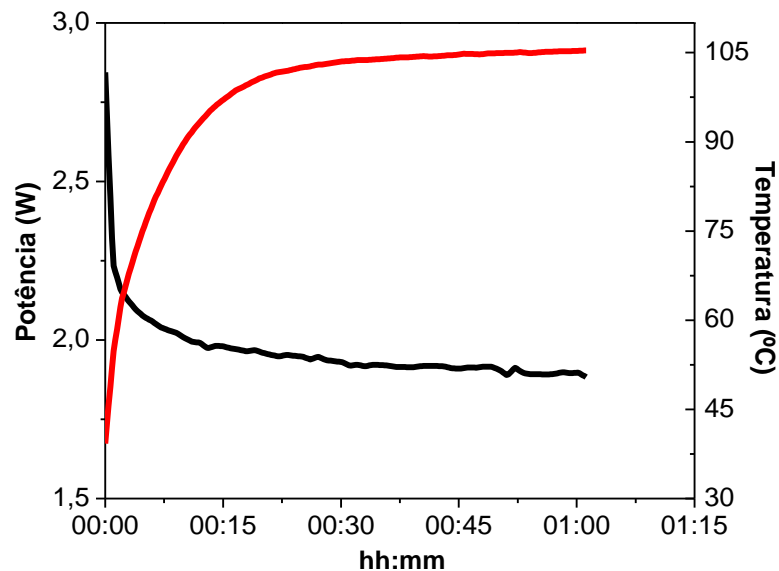


Figura 4.14 - Evolução da potência com o aumento da temperatura das células

A inclusão do sistema de arrefecimento contribui para arrefecer as células sendo que a temperatura máxima das células foi de 105,4 °C (Figura 4.14), menos aproximadamente 7°C comparativamente com os valores obtidos sem sistema para arrefecimento das células. Registrou-se um aumento de 10,3°C da água utilizada durante os ensaios.

4.5 Discussão de Resultados

Neste capítulo é feito a comparação dos resultados experimentais dos vários sistemas de arrefecimento. É apresentado o cálculo do rendimento das células de cada um dos sistemas de arrefecimento utilizados durante a experiência.

4.5.1 Temperatura das células

Foram sempre utilizadas as mesmas células fotovoltaicas, ligadas em série, as quais foram expostas a uma radiação constante de 800W/m^2 durante aproximadamente 1 hora. No sistema em que não se utilizou nenhum sistema de arrefecimento nota-se que os valores da temperatura são maiores.

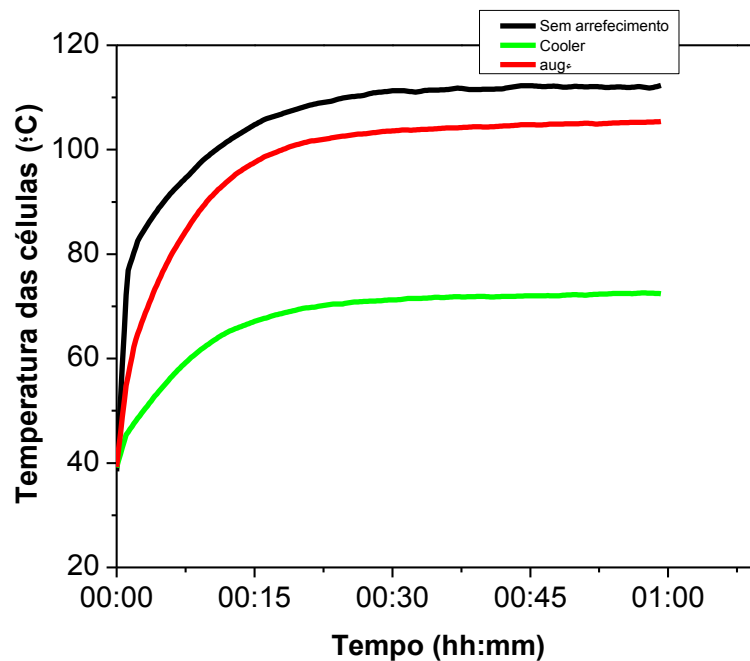


Figura 4.15 - Evolução da temperatura

Pelo gráfico da Figura 4.15 é perceptível que nos ensaios em que se utilizou o cooler para o arrefecimento das células fotovoltaicas, há uma diminuição notória na temperatura. No arrefecimento em que se utilizou o sistema com serpentina e água, as células foram arrefecidas e houve um aumento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ da temperatura da água utilizada para o arrefecimento.

Tabela 4.5 - Resumo dos valores da temperatura das células e da água

Sistemas	Temperatura (°C)						Redução (%)
	Células		Água		Ganho água	Ganho célula	
	Min	Max	Min	Max			
Sem arrefecimento	38	112				74	—
Cooler	39	72				33	36
Gua	39	105	25	35	10	66	6

As duas células fotovoltaicas policristalinas estudadas têm uma redução da temperatura de aproximadamente 36% relativamente à temperatura que atingem sem qualquer arrefecimento. No ensaio em que se utilizou o cooler é notório que o aumento da temperatura é mais lento do que nos outros ensaios.

4.5.2 Potência e o aquecimento das células FV

Com a diminuição da temperatura das células fotovoltaicas há um aumento da tensão das mesmas e consequente aumento nos valores da potência.

O gráfico da Figura 4.16, mostra que os valores da potência das células são menores quando as células são simplesmente expostas à radiação dos projectores sem nenhum meio de arrefecimento. Com a introdução do cooler ou da serpentina com água é menor a diminuição nos valores da potência das células em Watts.

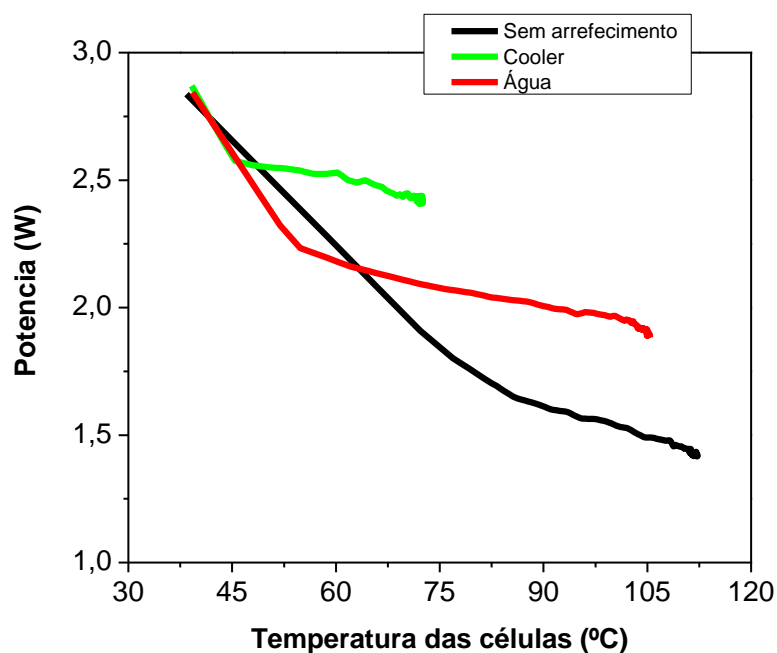


Figura 4.16 - Evolução da potência em função da temperatura das células

Quando as células são simplesmente expostas à radiação, pelo gráfico da Figura 4.16, é possível observar uma diminuição muito acentuada da potência com o aumento da temperatura das células. Com a inclusão do cooler ou recorrendo à refrigeração das células observa-se uma menor diminuição da potência das células. É perceptível que para uma mesma temperatura, entre o sistema sem nenhum meio de arrefecimento e os sistemas em que se utilizou água e ar para a refrigeração das células, a potência em ambos os casos são completamente distintos. Quanto maior o aumento da temperatura das células menor o valor da potência das mesmas.

Tabela 4.6 – Análise da Potência das células

	Potência Inicial	Potência Final	Perda (W) Início/fim	Perda (%)	Ganho (W)	Ganho Relativo (%)
Sem arrefecimento	2,84	1,43	1,41	50%	0,00	0%
Arrefecimento cooler	2,87	2,41	0,46	16%	0,95	67%
Arrefecimento água	2,84	1,88	0,96	34%	0,45	32%

O primeiro sistema que é sem nenhum meio de arrefecimento serve de referência para analisar os diferentes meios de arrefecimento. No sistema em que as células não estavam sujeitas a nenhum meio de arrefecimento houve uma perda em termos de potência de 50 % devido a um grande aumento da temperatura das células. Arrefecendo as células é possível observar uma diminuição no que se refere à perda da potência. Relativamente ao sistema sem arrefecimento houve um ganho de 67 % quando se utilizou o cooler para o arrefecimento das células e um ganho de 32 % quando se utilizou água para a refrigeração.

4.5.3 Rendimento eléctrico das células fotovoltaicas

A curva do rendimento da célula é obtida através da Equação (4.2). Como a resistência de carga foi dimensionada por forma a se trabalhar no ponto de potência máxima P_{\max} , os valores foram obtidos experimentalmente.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{A \times G} \quad (4.2)$$

Sendo $A = c \times l = 0.15 \times 0.15 = 0,0225\text{m}^2$ e $G = 800 \text{ W/m}^2$

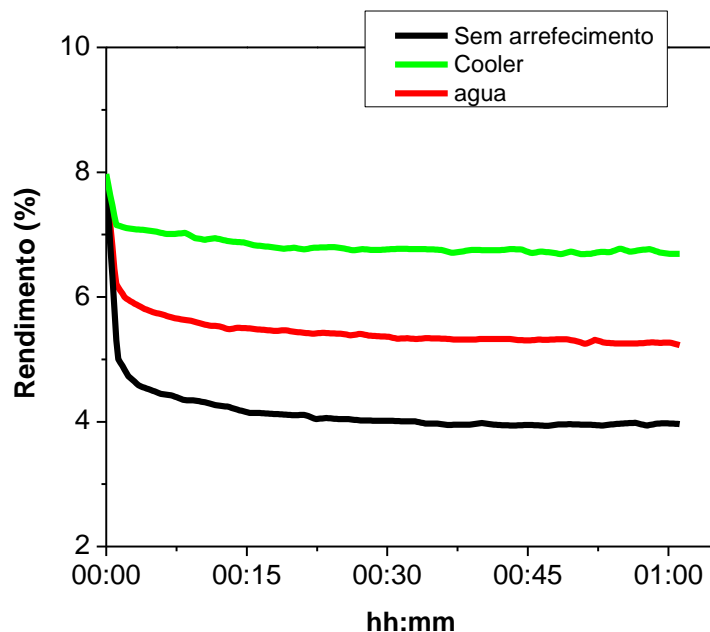


Figura 4.17 - Rendimento eléctrico das células com diferentes sistemas de refrigeração

Com o cooler ligado o rendimento eléctrico das células é superior comparativamente com os outros sistemas de refrigeração. Pelo gráfico da Figura 4.17 observa-se diminuição brusca do rendimento no início do ensaio que tende a estabilizar ao longo do tempo.

Tabela 4.7 - Rendimento eléctrico das células

Sistemas	Rendimento Eléctrico (%)		
	Min	Max	Média
Sem arrefecimento	3,9	7,9	4,1
Cooler	6,7	8,0	6,8
Água	5,2	7,9	5,5

O sistema em que se utilizou o cooler para a refrigeração das células apresenta um valor de rendimento superior aos restantes sistemas, não contabilizando a potência do *cooler*. Considerando a potência do *cooler*, o rendimento do sistema é afectado negativamente pelo que, seria necessário uma quantidade de células superior a 41, para que o rendimento deste sistema fosse superior ao do sistema sem arrefecimento.

Tabela 4.8 - Influência do Cooler

Sistemas	Rendimento (η)
Sem arrefecimento	4,1 %
Cooler (41 células)	$\frac{41 \times 1,2 - 19}{4,1 \times 0,0225 \times 800} = 4,09\%$

Ao se utilizar o sistema com água inicialmente à temperatura ambiente, a circular pela serpentina de cobre, verifica-se pela Tabela 4.5, que há uma redução de 6% no valor da temperatura das células em relação ao sistema sem nenhum arrefecimento. Esta redução está relacionada com um aumento de 10°C ($T_1=25$; $T_2=35$) nos 5l de água utilizados para o arrefecimento das células.

O aumento de temperatura de 10 °C nos 5l de água usados para o arrefecimento das células, representa uma quantidade de energia retirada das células e adicionado à água que se calcula do seguinte modo:

$$Q = V \times (T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

Em que:

Q = energia em Kcal

V = volume em litros

T = temperatura em °C

$$Q = 5 \times (35 - 25) = 50 \text{ Kcal} = 58Wh \quad (4.4)$$

Esta energia apresentada no período de 1h em que durou o ensaio, deverá ser considerada no futuro para o cálculo do rendimento global de um sistema refrigerado a água, com fins múltiplos em que a água aquecida tenha a possibilidade de ser usada em aplicações que necessitem de água quente.

5 Montagem e Instalação de Painéis Fotovoltaicos

Este capítulo pretende dar a conhecer as diferentes fases de uma instalação fotovoltaica. Ao longo do capítulo descreve-se a montagem e instalação de painéis fotovoltaicos feita na secção de máquinas eléctricas, situada no bloco E do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL).

5.1 Localização e a instalação

Foi feita uma instalação de painéis fotovoltaicos no terraço da secção de máquinas eléctricas do ISEL situado em lisboa, mais concretamente em chelas, Rua Conselheiro Emídio Navarro a 38.756830°, -9.117120° de latitude e longitude respectivamente. Foram instalados 3 *strings* de painéis fotovoltaicos e cada *string* é constituído por três módulos solares SM110 fabricados pela Siemens²⁵, ou seja no total foram instalados 9 módulos solares fotovoltaicos com uma potência de 110 W cada.



Figura 5.1 – Estrutura do *string* constituído por três módulos solar SM110

²⁵ Os painéis foram cedidos pela FCT-UNL (CENIMAT), no âmbito de um trabalho de doutoramento comum com o ISEL.

Em cada *string*²⁶ os painéis solares fotovoltaicos foram ligados em série entre si. Quando se ligam módulos fotovoltaicos em série, a tensão resultante é a soma das tensões de cada um dos módulos e a corrente resultante, coincide com a menor das correntes entregues pelos módulos. Cada *string* tem segundo os dados do fabricante para cada módulo, uma tensão de 105 V que é a resultante da soma dos três painéis ligados entre si. A potência instalada é de 990 W. Os três *strings* ligados em paralelo entre si, foram posteriormente ligados a um inversor PVI-3600-AU, que por sua vez foi ligado em paralelo à rede eléctrica do laboratório.

5.1.1 Painéis fotovoltaicos

Os módulos solares instalados são fabricados pela *Siemens* seguindo um elevado padrão de qualidade, podendo assim suportar condições ambientais extremas que por outro lado garante um tempo de vida útil longo. Cada um dos módulos solares apresentados na figura acima tem uma garantia de 25 anos, sendo que pelo menos durante esse período é de esperar que os módulos fotovoltaicos não se avariem e apresentem a potência de saída determinada pelo fabricante. As células solares que constituem os dos módulos solares PV instalados são produzidos com tecnologia PowerMax®, ou seja são optimizadas de modo que os módulos possam produzir energia sob as condições mais adversas existentes e para que a absorção da luz solar seja elevada mesmo em situações com menor intensidade de luz. Os módulos *Siemens* com tecnologia PowerMax® foram desenvolvidos para fornecer a energia máxima ao longo de todo o dia. A alta qualidade dos módulos solares em estudo é comprovada pelos seguintes certificados: IEC61215, TÜV safety class II e CE mark.

Tabela 5.1 - Especificação técnica do módulo solar SM110

Parâmetros eléctricos	Grandezas	SM110
Potência máxima, P_{max}	[W]	110
Configuração	-----	24 V
Corrente máxima, I_{sc}	[A]	3.15
Tensão no ponto potência máxima, I_{mpp}	[V]	35.0
Corrente curto-circuito	[A]	3.45
Tensão de circuito aberto, V_{oc}	[V]	43.5

²⁶ Conjunto de painéis fotovoltaicos ligados em série entre si.

Um módulo SM110 é constituído por 72 células solares e produzidas com a tecnologia PowerMax®. A junção destas 72 células forma um módulo solar cujas dimensões são: 1316 x 660 mm, e um peso de 11.5 Kg. A potência máxima do módulo solar é determinada segundo as condições STC²⁷ (Standard Test Conditions).

5.1.2 Tipo de estrutura de fixação

Como foi referido anteriormente cada *string* é constituído por três módulos fotovoltaicos. A instalação dos três *strings* foi realizada no telhado plano do laboratório de máquinas eléctricas, sobre uma das vigas do edifício com 26.5 cm de largura. Devido a limitações financeiras optou-se por instalar uma estrutura fixa, em vez de um seguidor solar. Os painéis fotovoltaicos foram fortemente fixados utilizando sempre perfil metálico precavendo esforços devido a factores como vento e tempestades.

5.1.3 Orientação dos painéis fotovoltaicos

A inclinação dos painéis solares têm por objectivo otimizar a captação da radiação solar tendo em conta a variação da altura solar ao longo do ano. A altura solar é o ângulo compreendido entre o raio solar e a projecção do mesmo sobre o plano horizontal.

A instalação feita tem por objectivo otimizar a inclinação dos painéis fotovoltaicos por forma a maximizar a radiação solar recebida. O estudo sobre a inclinação dos painéis fotovoltaicos varia consoante a literatura, embora todos tenham o objectivo de maximizar a energia captada pelos painéis fotovoltaicos, os ângulos propostos são bastante diferentes, variando de autor para autor.

O ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos instalados no edifício da secção de máquinas eléctricas do ISEL, pode ser alterado entre três ângulos diferentes: 23°, 38° e 53°. O ângulo escolhido foi de 38° correspondente à Latitude de Lisboa, sendo que quando se pretende uma instalação para a estação de inverno, deve-se adicionar +15° à Latitude local e na época de verão subtrai-se 15° à latitude do local.

Os painéis foram instalados durante os meses de Novembro e Dezembro sendo que no mês de Janeiro já se começou a recolher os dados fornecidos pelos painéis fotovoltaicos instalados. Na instalação inicial os *strings* foram orientados a um ângulo de 53° correspondente à estação do ano.

²⁷ T=25°C, G= 1000 W/m²

5.1.4 Sombreamentos

A escolha do local para a instalação dos sistemas fotovoltaicos é de extrema importância e é feita para que toda a energia solar recebida pelos painéis fotovoltaicos seja convertida em energia eléctrica. A eficiência dos módulos fotovoltaicos bem como a segurança dos mesmos está directamente dependente do tipo de ligações existentes entre os módulos PV e a possibilidade de ocorrer sombreamento nas células dos módulos PV. A curva característica de um módulo PV altera-se em função do sombreamento a que está sujeito, ou seja há um desvio do ponto máximo de potência, havendo assim uma redução da potência de saída em comparação a um módulo sem o efeito de sombreamento.

O sombreamento das células a acontecer é derivado de vários factores tais como, sujeira acumulada ao longo do tempo, árvores situados relativamente perto da instalação, folhas que possam cair em cima dos módulos ou de outras estruturas ou edifícios situados relativamente próximo da instalação fotovoltaica.

O sombreamento de apenas uma das células de um módulo fotovoltaico pode levar a consequências graves e em casos extremos até a degradação dos módulos. Quando uma célula estiver sombreada esta passará a estar inversamente polarizada, actuando como uma carga eléctrica convertendo a energia eléctrica em calor. Se a corrente for elevada há uma dissipação elevada da potência e consequentemente provocará um aquecimento que pode causar danos à célula. Este fenómeno é denominado de *hot-spot*. Para prevenir esta situação são instalados díodos internos e a corrente deverá ser desviada da célula solar através de uma derivação da corrente utilizando dispositivos de protecção, como por exemplo díodos *bypass*.

5.1.4.1 Distância entre *strings*

Para um melhor aproveitamento da radiação solar por parte dos módulos fotovoltaicos e aumentar assim a produtividades dos mesmos é de extrema importância certificar-se de que durante o período de melhor radiação²⁸ não há um sombreamento nos painéis devido a edifícios, árvores e outras estruturas nas proximidades da instalação. Outra situação a ter em conta quanto a questões de sombreamento é a distância a manter entre *strings* para que os da frente não provoquem sombreamentos nos módulos posicionados atrás.

Para evitar os casos acima citados é preciso fazer um bom dimensionamento da posição dos módulos fotovoltaicos instalados. Um bom dimensionamento da posição dos módulos fotovoltaicos a instalar, possibilita que existindo o espaçamento correcto entre os *strings*, seja evitado o sombreamento de células ou módulos fotovoltaicos e ainda permitir uma boa

²⁸ Horas de pico geralmente das 9h às 17h.

circulação do ar entre os *strings* contribuindo assim para algum arrefecimento dos módulos instalados. Este dimensionamento pode ser feito através da seguinte equação:

$$F = F_e \times (H_0 - H_m) \quad (m) \quad (5.1)$$

Sendo que:

F – distância

F_e – factor de espaçamento (depende da latitude do local da instalação);

H_0 – altura do objecto;

H_m – altura em relação ao nível do solo em que se encontram instalados os módulos;

Utilizando a equação (5.1) os *strings* foram instalados de forma a estarem afastados a uma distância de pelo menos 22 m de algumas árvores presentes nas proximidades do local onde foi feita a instalação do sistema fotovoltaico.



Figura 5.2 – Fotografia dos painéis instalados realçando o espaçamento entre *strings*

Visto que no telhado onde foi feita a instalação do sistema fotovoltaico haver bastante espaço vazio, o espaçamento determinado entre os *strings* foi de 5 m. Esta distância permite ter uma margem de segurança e permite garantir uma redução das perdas do sistema quanto ao sombreamento mútuo entre *strings*.

5.1.4.2 Díodos de bloqueio e *by-pass*

Nos módulos fotovoltaicos são geralmente integrados díodos *by-pass*, colocados em paralelo com uma célula ou com um conjunto de células ligadas em série entre si, para evitar o bloqueio

do sistema fotovoltaico em caso de avarias dos módulos. A função de um díodo de *by-pass* é proteger o módulo PV dos sombreamentos, ou seja no caso de uma célula estar total ou parcialmente sombreada, o díodo de *by-pass* desvia a corrente que passa pela célula avariada. Um módulo fotovoltaico geralmente dispõe de um a três díodos *by-pass* consoante o número das células integradas no módulo PV.

Em instalações em que existem vários *strings* utiliza-se normalmente díodos *by-pass*²⁹ em paralelo com os módulos, com o objectivo de desviar a corrente de um módulo avariado, tornando o módulo defeituoso inactivo. Nos casos em que os módulos estão ligados em paralelo são utilizados neste caso díodos de bloqueio para se evitar curto-circuitos e correntes inversas entre *strings* no de caso alguma avaria.

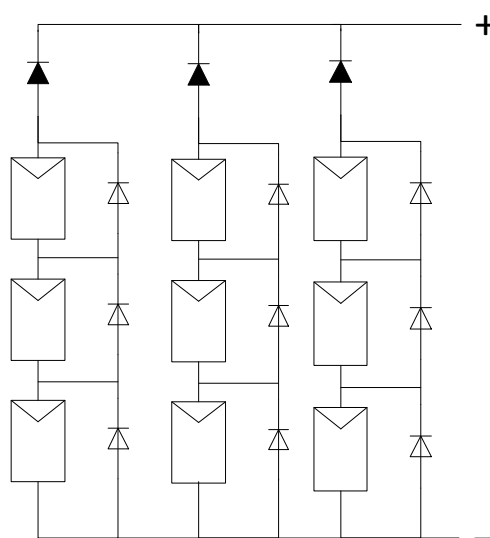


Figura 5.3 - Díodos de bloqueio e by-pass numa string

Na Figura 5.3 está representado a disposição de díodos de bloqueio e by-pass num sistema fotovoltaico constituído por três *strings* ligados em paralelo entre si. Cada módulo fotovoltaico de um *string* tem acoplado um díodo *by-pass* ligado em paralelo, que têm a função de fazer circular menos corrente pelo módulo no caso de um sombreamento parcial ou completo. Entre cada *string* (ligados em paralelo), são utilizados díodos de bloqueio para evitar curto-circuitos e correntes inversas entre *strings*, no caso de alguma avaria em algum dos *strings*.

²⁹ Díodos de by-pass ou desvio – o díodo normalmente utilizado nas instalações são os díodos Schottky.

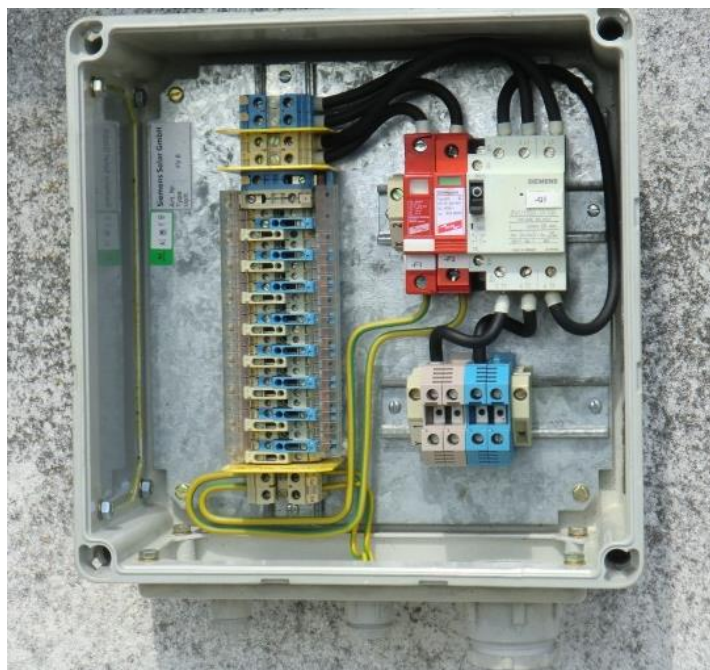


Figura 5.4 - Fusíveis de protecção do sistema PV instalado

Os díodos de bloqueio entre strings podem ser suprimidos, recorrendo para o efeito à utilização de fusíveis de protecção nos dois lados dos strings. Protegendo assim contra sobreintensidades e possíveis correntes inversas no sistema. Os cabos de cada um dos strings são ligados paralelamente, juntamente com as protecções DC, na caixa de junção conforme representado na Figura 5.4. As caixas de junção para instalações fotovoltaicas exteriores devem respeitar a norma CEI 60439-1.

5.1.5 O Inversor

A tensão de saída nos módulos fotovoltaicos é uma tensão contínua (DC). Os inversores são conversores electrónicos de potência que têm a finalidade de transformar corrente contínua em corrente alternada, mudando a sua forma de onda. São utilizados, por exemplo, quando se quer alimentar uma carga AC através de uma fonte CC. Como os módulos fotovoltaicos geram tensão sob a forma de corrente contínua, para se utilizar equipamentos como TV's, rádios, motores ou qualquer outro tipo de carga que opere em corrente alternada, deve-se recorrer à utilização do inversor CC/AC.

Em sistemas com ligação à rede eléctrica, os inversores estão ligados directamente à rede principal. Nesta situação, operam como interface entre o painel e a rede de modo a adequar as grandezas DC do painel às formas de onda AC exigidas pela rede.



Figura 5.5 - Esquema de um sistema fotovoltaico ligado a uma rede eléctrica

O sistema fotovoltaico instalado é composto por três *strings* conectados entre si em paralelo e ligados à caixa de protecção somando uma potência de 990 Wp, foi posteriormente ligado ao inversor de rede PVI-3600. O inversor instalado tem uma potência de 3600 W e é um inversor do tipo *Grid-Tie*, utilizado em sistemas fotovoltaicos ligados a uma rede eléctrica.

5.1.6 Rendimento do inversor

Nos inversores ocorrem perdas na conversão da energia eléctrica que influenciam o seu rendimento. Estas perdas são geralmente de dois tipos: perdas constantes que não variam como o regime de carga e perdas que aumentam com o regime de carga.

$$\eta_{inv} = \frac{P_{CA}}{P_{CC}} \quad (5.2)$$

O rendimento de um inversor é traduzido pelo quociente entre a potência de saída CA e a potência CC que lhe é entregue para a conversão.

5.2 Monitorização dos Módulos Fotovoltaicos

Com o inversor de rede ligado ao computador recolheram-se os valores da corrente eléctrica e tensão em CA, gerada pelos módulos fotovoltaicos instalados. Sabe-se que a eficiência dos módulos fotovoltaicos está dependente da radiação solar (que variam ao longo do dia e ao longo do ano) e da temperatura dos módulos.

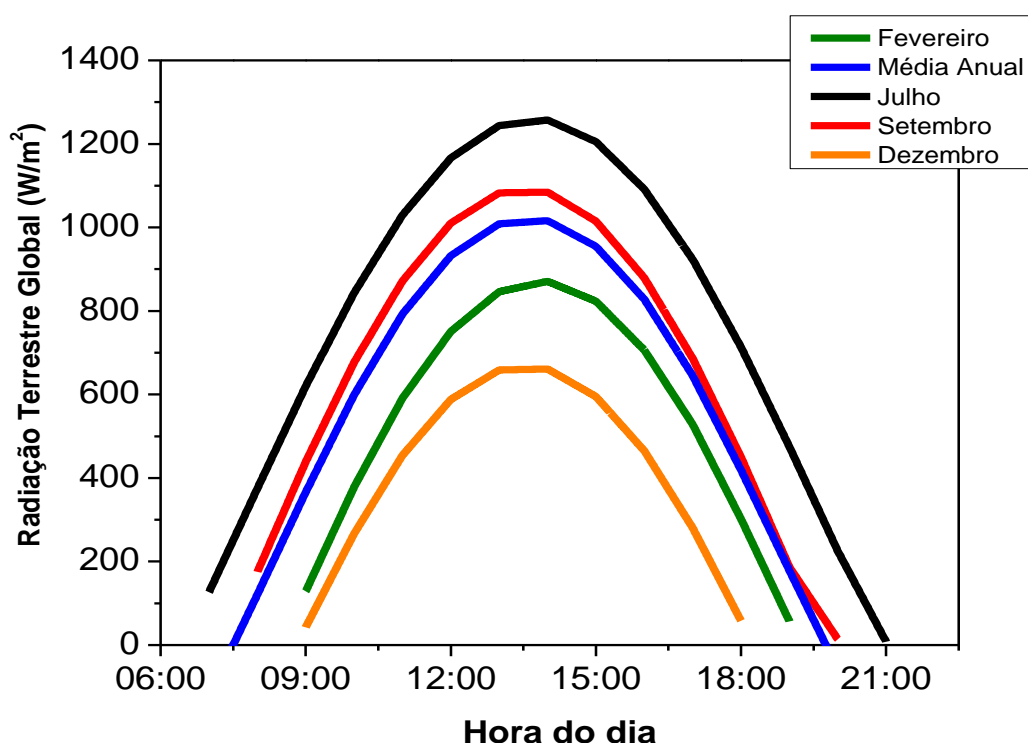


Figura 5.6 - Radiação Terrestre Global referente ao ano de 2011 no ISEL

Na figura acima apresenta-se um exemplo da evolução da radiação solar global terrestre ao longo do dia de alguns meses do ano de 2011 e uma média anual do mesmo. A radiação solar terrestre global foi obtida segundo as coordenadas GPS da instalação fotovoltaica, recorrendo para o efeito à calculadora *MIDC Solpos*³⁰. No mês de Dezembro o máximo da radiação solar ao meio dia solar foi de 686.2 W/m² e em Julho, estação de verão, o máximo da radiação solar na mesma hora foi de 1269 W/m².

5.2.1 Estimativa da Energia Produzida

Para se obter uma estimativa da energia produzida pelo sistema fotovoltaica, recorreu-se à calculadora PVGIS^{31 32}. A estimativa é obtida fornecendo à calculadora PVGIS dados e

³⁰ [Http://www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html](http://www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html)

³¹ [Http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis)

características do sistema fotovoltaico instalado. Características tais como as coordenadas geográficas, a potência instalada a tecnologia de fabrico dos módulos fotovoltaicos, o tipo de estrutura de fixação e ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, são fundamentais para uma estimativa com uma menor margem de erro.

No gráfico que se segue é apresentado o gráfico da estimativa dada pela calculadora PVGIS do mês de Janeiro a Julho.

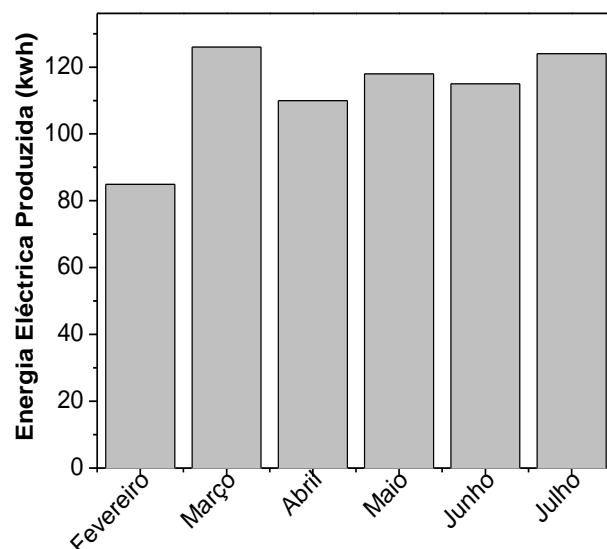


Figura 5.7 - Estimativa PVGIS da energia produzida durante os meses de Fevereiro a Julho

Durante este período é estimada uma produção de energia eléctrica de cerca de 677,9 kW.h. O mês de Fevereiro como era de esperar apresenta uma estimativa de energia produzida mais baixa.

5.2.2 Energia Produzida

A monitorização dos módulos fotovoltaicos instalada iniciou-se no dia 21-01-11. A energia referente ao mês Janeiro não é apresentada no estudo para o ano de 2011, pois os dados obtidos correspondem a apenas 10 dias de monitorização ou seja era de se esperar que a energia eléctrica acumulada produzida apresentada no gráfico fosse bastante inferior em comparação com os restantes meses da monitorização.

³² Photovoltaic Geographical Information System

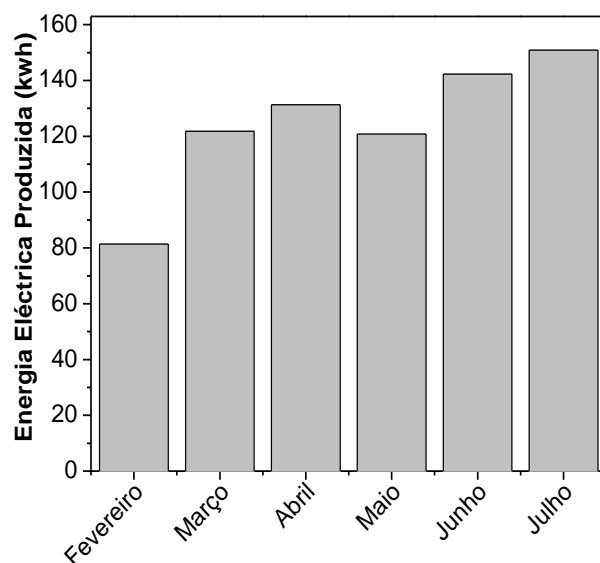


Figura 5.8 – Energia Produzida nos meses de Fevereiro a Julho – Ano 2011

Em comparação com os valores da estimativa PVGIS verifica-se que a energia eléctrica produzida pelos módulos fotovoltaicos instalados é superior nos meses de Abril, Maio, Junho e Julho, sendo que nos meses de Março e Fevereiro a quantidade de energia produzida é praticamente a mesma que a estimada.

Se se ignorar o mês de Janeiro (apenas 10 dias de monitorização) tanto na estimativa como na energia realmente acumulada, observa-se que o total da energia produzida 748,6 kWh é superior à energia estimada PVGIS 677,9 kWh.

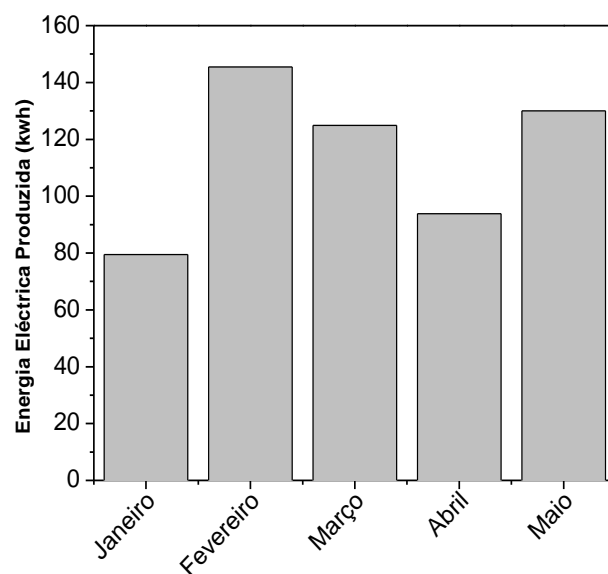


Figura 5.9 - Energia Produzida nos meses de Janeiro a Maio – Ano 2012

A energia eléctrica produzida nos meses realçados no gráfico, demonstra que em comparação com os dados da estimativa realizada, em 2012 a quantidade de energia produzida é superior nos meses de Fevereiro e Maio. No entanto nos meses de Janeiro e Abril a energia produzida fica aquém da estimativa realizada. Em Março a energia eléctrica produzida é semelhante ao esperado.

Tabela 5.2 – Total de energia eléctrica produzida

	PVGIS	Ano 2011	Ano 2012
Total Energia Produzida (kWh)	438,9	455,3	494,2

Na Tabela 5.2 está representada o total de energia estimado e produzido nos meses de Fevereiro a Maio. Neste intervalo pode-se garantir que os módulos instalados estiveram sempre operacionais sem nenhuma interrupção.

A quantidade de energia produzida pelos módulos fotovoltaicos foi sempre superior do que a estimada PVGIS. No ano de 2012 o total de energia acumulada é maior do que o ano de 2011 conforme a tabela acima apresentada.

6 Conclusão e perspectivas futuras

Ao longo deste trabalho fez-se a aplicação de um modelo matemático de uma célula solar em Simulink, realizou-se uma instalação fotovoltaica de potência média conectado à rede do laboratório de máquinas eléctricas do ISEL e por fim fez-se um estudo para analisar o efeito da temperatura das células na sua potência e rendimento, assim como, estudar possíveis meios para o arrefecimento das mesmas.

Sendo a primeira fase deste trabalho, a modelação matemática realizada basicamente serviu de base para se estudar e compreender melhor o comportamento de uma célula solar fotovoltaica sob influência de certas condições ambientais como a temperatura e a radiação solar. Inicialmente foram estudados e desenvolvidos três modelos equivalentes de uma célula solar fotovoltaica. Confirma-se pelos resultados das simulações que o modelo matemático implementado mais fiável é o modelo simplificado, que apresenta os valores mais próximos dos parâmetros (I_{pmax} , V_{pmax} , P_{max}) fornecidos pelo fabricante, sendo que o modelo dos dois díodos é o que apresenta maior discrepância em relação a esses parâmetros.

O modelo matemático modificado desenvolvido permite a um utilizador projectar um sistema fotovoltaico a partir dos parâmetros fornecidos pelo fabricante, dos dados da temperatura ambiente e da radiação do local da instalação. Uma simulação não é bem a realidade, mas no entanto permite ainda assim antes de se instalar um sistema fotovoltaico ter um estudo antecipado da potência (curva P-V) que o sistema irá produzir e como se irá comportar perante certas condições.

Na segunda fase desta dissertação, optimização das células fotovoltaicas, foi possível comprovar experimentalmente o efeito ou influência da temperatura das células no seu comportamento eléctrico.

Com as células expostas a uma radiação constante sem nenhum meio para o arrefecimento das células solares é visível o elevado aumento da temperatura das células, que chegam a atingir 112 °C, ou seja um aumento de 74 °C em relação à temperatura inicial. Com um aumento bastante significativo da temperatura das células fotovoltaicas era de se esperar alterações no seu comportamento eléctrico. Com a inclusão de meios para o arrefecimento das células é

possível observar uma diminuição de mais de 35% na temperatura das células FV no sistema com o cooler e 6 % no sistema com serpentina e água, relativamente ao sistema sem nenhum meio de arrefecimento.

Quando as células estão apenas expostas à radiação sem nenhum meio de arrefecimento constata-se que há perdas de 50% em relação à potência de saída das células. Pela análise da potência das células verifica-se que arrefecendo as células com o cooler há um ganho de 67% e utilizando a serpentina com água um ganho de potência de 32%. Fica bem patente neste caso a necessidade da refrigeração das células com obtenção de ganhos em termos de potência superiores a 60%.

O rendimento eléctrico varia de forma directamente proporcional à potência e inversamente proporcional à temperatura, sendo neste caso perceptível um rendimento 4,1 % sem o uso de um sistema para o arrefecimento. Nas experiências realizadas em que se utilizou o *cooler* para se arrefecer as células observa-se que a diminuição do rendimento é inferior comparativamente aos outros sistemas, ou seja, com o cooler ligado durante a exposição à radiação obtém-se um rendimento médio de 6,8 %.

Com a utilização do sistema de arrefecimento com água a circular pela serpentina de cobre, há uma diminuição no rendimento de 7,4 % em relação ao cooler. Neste caso além do aumento no rendimento eléctrico das células PV, houve um ganho na temperatura da água de 10 °C, com apenas duas células ligadas em série. O aumento da temperatura da água em outras proporções numa aplicação real, poderá ser utilizado para fins comerciais e industriais.

Na terceira e última fase desta dissertação, instalação do sistema PV de média potência, permitiu adquirir conhecimentos quanto às diferentes fases de uma instalação fotovoltaica, desde a escolha do local de instalação, ângulo de inclinação espaçamento entre os módulos PV, sombreamentos, escolha do inversor até à fase da monitorização e recolha dos dados da energia produzida. No que concerne aos dados recolhidos durante os períodos de monitorização constata-se que o sistema PV instalado no Laboratório de máquinas eléctricas do ISEL apresenta um bom desempenho (com uma potência máxima atingida de 770 W) comparativamente aos dados da estimativa PVGIS. A energia eléctrica estimada durante os meses de Fevereiro e Maio era de 438,9 kWh, mas na prática a energia eléctrica produzida pelo sistema fotovoltaico instalado foi sempre superior, com valores de energia produzida na ordem dos 455,34 kWh em 2011 e 499,245 kWh em 2012.

6.1 Perspectivas futuras de desenvolvimento

No futuro pretende-se adicionar a variação de inclinação dos ângulos dos módulos instalados no modelo matemático desenvolvido em *Simulink* e o cálculo automático do rendimento do sistema fotovoltaico.

Perspectiva-se introduzir um sistema de baterias para o armazenamento de energia e realizar um estudo sobre a influência do ângulo de inclinação dos módulos PV no rendimento do sistema instalado. Os *strings* instalados já estão preparados para a mudança do ângulo de inclinação. Ainda na instalação fotovoltaica realizada no ISEL pretender-se-á desenvolver meios de incorporar alguns dos sistemas de arrefecimento estudados nos módulos PV, assim como desenvolver outras formas de arrefecimento, com o objectivo de aperfeiçoar e conseguir um melhor meio de se arrefecer os módulos e que seja viável economicamente.

6.2 Considerações Finais

Tendo em conta o estudo e a análise realizada ficou bem patente a necessidade e a importância do arrefecimento das células solares fotovoltaicas em funcionamento. Dos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema de arrefecimento mais vantajoso em termos do rendimento eléctrico conseguido é o sistema com o *cooler*, sendo que por outro lado no que concerne à sua aplicação em termos práticos será o mais complicado de se implementar. A implementação de um sistema que para além de arrefecer as células, com um aumento do rendimento eléctrico de 25% e um ganho da temperatura da água suficiente para o reaproveitamento da água quente para outros fins, parece ser promissora carecendo contudo de comparação com os custos para aquecimentos industriais e comerciais de água por meios tradicionais (por exemplo caldeiras).

7 Bibliografia

1. **Green, Martin.** *Photovoltaics: Coming of Age.* New South wale Univ., Kensington, NSW : 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 21-25 May 1990. pp. 1-8. Vol. 1.
2. **António Luque, Steven Hegedus.** *Handbook of Photovoltaic Science and.* Southern Gate, Chichester, England : John Wiley & Sons, 2003. p. 12.
3. **Zacahary Alden Smith, Katrina D.Taylor.** *Renewable and Alternative Energy Resources: A Reference Handbook.* California, USA : ABC-CLIO, 2008. p. 164.
4. **Christian Bracher, John B. Delos,Vassiliki Kanellopoulos,Manfred Kleber,Tobias Kramer.** *The photoelectric effect in external fields.* : Physics Letters A, 2005. pp. 62-66. Vol. 347. .
5. **Pajaczowska, Prof. Dr hab. Anna.** *Professor Dr. Jan Czochralski - An inventor.* Warsaw, Poland : Institute of Electronic Materials Technology, 2001.
6. **Perlin, J.** *Silicon Solar Cell Turns 50.* , Golden, CO. (US) : National Renewable Energy Lab., 2004. BR-520-33947.
7. **A.Rohatgi.** *Road To Cost-Efective Crystalline Silicon Photovoltaics.* Osaka,Japan : 3rd World Conference eon Photovoltaic Energy Conversion, May-11-18, 2003.
8. **Irena.** RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES:COST ANALYSIS SERIES. *Solar Photovoltaics.* Germany : The International Renewable Energy Agency, June 2012, Vol. 1:Power Sector Issue 4/5.
9. **Roger Messenger, D. Yogi Goswami.** Photovoltaics Fundaments, Tecnology and Application. *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy.* USA : Taylor, 2007, 23, pp. 23-35.
10. **Birkmire, Robert.** Thin-Film Solar Cells and Modules. [book auth.] Lewis Fraas and Larry Partain. *Solar Cells and Their Applications, Second Edition.* New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2010, Vol. 6, pp. 137-157.
11. **Andreas Kay, Michael Gritzel.** Low Cost Photovoltaic Modules based on Dye Sensitized Nanocrystalline Titanium Dioxide and Carbon Powder. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 1996, Vol. 44, pp. 99-117.
12. **Cotal, H.L., Spectrolab Inc., Sylmar, CA ,Lillington, D.R., et al.** *Triple-junction solar cell efficiencies above 32%: the promise and challenges of their application in high-conceniration-ratio PV systems.* [ed.] Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE. Anchorage : Photovoltaic Specialists Conference, 2000., 2000. ISSN:0160-8371.

13. **Cunningham, D. BP Solar, Fairfield, CA, Davies, K., et al.** *Large area Apollo(R) module performance and reliability*. Anchorage : Photovoltaic Specialists Conference, 2000, 2000. pp. 13-18. ISSN : 0160-8371.
14. **M.A. Green*, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham.** *Progress and outlook for high-efficiency*. Sydney, Australia : Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales, 2001. pp. 9-16. Vols. 65, Issues 1-4.
15. **M.A. Green, P.A. Basore, N. Chang, D. Clugston, R. Egan, R. Evans, D. Hogg, S. Jarnason, M. Keevers, P. Lasswel, J. O Sullivan, U. Schubert, A. Turner, S.R. Wenham, T. Young.** *Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules*. 2004. pp. 857-863. Vol. 77.
16. **T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. More, E. Stefanakos, , H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya.** *Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects*. *Solar Energy*. 2011, Vol. 85, pp. 1580-1608.
17. **Nanosolar, Research and Development.** *HIGH-PERFORMANCE THIN-FILM PHOTOVOLTAICS USING LOW-COST PROCESS TECHNOLOGY*. Tokyo, Japan : NREL. PVSEC 17.
18. **Vernie Everett, Andrew Blakers, Klaus Weber, and Evan Franklin.** *Very High Efficiency Solar Cells*. Alice Springs Convention Centre : ANZSES Solar 07 - ANZSES 45th Annual Conference, OCT 2007. p. 8.
19. **Allen Barnett, Douglas Kirkpatrick.** *Milestones Toward 50% Efficient Solar Cell Modules*. *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Milan, Italy : Newark, Delaware Univ, Sep 2007, p. 7.
20. **J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. S. Ward, A. Duda, W. J. Olavarria, T. E. Moriarty, J. T. Kiehl, M. J. Romero, A. G. Norman, and K. M. Jones.** *40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions*. Colorado, USA : National Renewable Energy Laboratory, 12 August 2008.
21. **Brendan M. Kayes, Hui Nie, Rose Twist, Sylvia G. Spruytte, Frank Reinhardt, Isik C. Kizilyalli, and Gregg S. Higashi.** *27.6% Conversion efficiency, a new record for Single-junction solar cells under 1 Sun illumination*. Santa Clara, CA, USA : Alta Devices, 2010.
22. **Cousins, P.J., SunPower Corp., San Jose, CA, USA, Smith, D.D., et al.** *Generation 3: Improved performance at lower cost*. Honolulu, 20-25 June 2010. pp. 000275-000278. 0160-8371.
23. **James D. McCambridge, Myles A. Steiner, Blair L. Unger, Keith A. Emery, Eric L. Christensen, Mark W. Wanlass, Allen L. Gray, Laszlo Takacs, Roger Buelow, Timothy A. McCollum, James W. Ashmead, Greg R. Schmidt, Alex W. Haas, John R. Wilc.** *Compact Spectrum Splitting Photovoltaic Module ith High Efficiency*. 2010. pp. Pages 253–377. Vols. 19, Issue 3.
24. **Wojtczuk, Steven,.** *Manufacturing of HighEfficiency Bi-Facial Tandem Concentrator Solar Cells*. Hudson, New Hampshire : NREL, 2010. pp. 7-29.

25. **GreenMA, Emery K, Hishikawa Y, WartaW.** Solar Cell efficiency tables (version 33). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2009, Vol. 17, pp. 85-94.
26. **Jäger-Waldau, Arnulf.** *Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics*. Ispra (VA), Italia : Refocus, 2010. Vol. 6.
27. **(ISA), India Semiconductor Association.** *Solar PV Industry 2010 : Contemporary scenario and emerging trends*. Bangalore : The Principal Scientific Adviser to the Government of India, May 2010.
28. **Jäger-Waldau, Arnulf.** *PV Status Report 2011*. European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy. Ispra, Italia : European Union, 2011. Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics. ISSN 1831-4155.
29. **Gaëtan Masson, Marie Latour, Daniele Biancardi.** *Global Market Outlook - For Photovoltaics until 2016*. [ed.] Craig Winneker. Brussels : European Photovoltaic Industry Association, May 2012. .
30. **Universidade Federal de Uberlândia.** *Materiais Semicondutores*. Brasil : Faculdade de Engenharia Elétrica Ciência e Tecnologia dos Materiais. pp. 73-95. Vol. 4.
31. **Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop.** Solar cell efficiency tables (version 39). *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*. 2012, Vol. 20, p. 13.
32. **S. Benagli, D. Borrello, E. Vallat-Sauvain, J. Meier, U. Kroll, J. Hötzel, J. Bailat, J. Steinhauser, M. Marmelo, G. Monteduro, L. Castens.,** *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference proceeding*. 2009. p. 2293.
33. **X. Wu, R.G. Dhere, D.S. Albin, T.A. Gessert, C. DeHart, J.C. Keane, A. Duda, T.J. Coutts, S. Asher, D.H. Levi, H.R. Moutinho, Y. Yan, T. Moriarty, S. Johnston, K. Emery, and P. Sheldon.** *High-Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells*. colorado : NREL, 2001. CP-520-31025.
34. **D.M Bagnall, M. Boreland.** Photovoltaic Technologies. *Energy Policy* . : Elsevier, 2008, Vol. 36, pp. 4390-4396.
35. **Technologies, Agilent.** *IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A*. USA, November 2009. 5990-4428EN.
36. **Firoz Khan, S.N. Singh, M. Husain.** Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. New Delhi, India : Elsevier, September, 2010, Vol. 94, 9, pp. 1473–1476.
37. **Grégoire Sissoko, Senghane Mbodji.** *A Method to Determine the Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf)*. 6. 2011. pp. 103-114. Vol. 2.
38. **Masters, G. M.** *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons., 2004. pp. 445-502.

39. **Cristina Camus, Eduardo Eusébio.** *Gestão Energia - Energia Solar*. Lisboa : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Março 2006. .
40. **Guimarães, Mário.** *Comportamento de Células Solares Fotovoltaicas de Si-a em Campo e sua Degradação* . 2011.
41. **Green, Martin A.** *High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts*. Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Sydney, Australia : Elsevier, 2003.
42. **Energy, U.S Department of.** *The History of Solar*. USA : Energy Efficiency and Renewable, 2005.

8 Anexos

Nos anexos serão apresentados os elementos complementares para a realização de cada capítulo. Serão apresentados os dados experimentais recolhidos e posteriormente utilizados na construção de gráficos e tabelas.

Anexo A – Modelação Matemática da célula solar

Nesta secção estão representados os respectivos subsistemas do Simulink referente ao modelo modificado para o estudo do efeito da temperatura nas células fotovoltaicas.

The image shows the 'Solver Configuration' dialog box in Simulink. It is divided into several sections: 'Simulation time' with 'Start time' at 0.0 and 'Stop time' at 0.614; 'Solver options' with 'Type' set to 'Variable-step', 'Solver' set to 'ode23tb (stiff/TR-BDF2)', 'Max step size' at 'auto', 'Min step size' at 'auto', 'Initial step size' at 'auto', 'Solver reset method' at 'Fast', 'Number of consecutive min steps' at 1, and 'Solver Jacobian method' at 'auto'; 'Tasking and sample time options' with 'Tasking mode for periodic sample times' at 'Auto', and two unchecked checkboxes for 'Automatically handle rate transition for data transfer' and 'Higher priority value indicates higher task priority'; and 'Zero-crossing options' with 'Zero-crossing control' at 'Use local settings', 'Algorithm' at 'Nonadaptive', 'Time tolerance' at '10*128*eps', 'Signal threshold' at 'auto', and 'Number of consecutive zero crossings' at 1000.

Simulation time	
Start time:	0.0
Stop time:	0.614

Solver options	
Type:	Variable-step
Max step size:	auto
Min step size:	auto
Initial step size:	auto
Solver reset method:	Fast
Solver:	ode23tb (stiff/TR-BDF2)
Relative tolerance:	1e-3
Absolute tolerance:	auto
Shape preservation:	Disable all
Number of consecutive min steps:	1
Solver Jacobian method:	auto

Tasking and sample time options	
Tasking mode for periodic sample times:	Auto
<input type="checkbox"/> Automatically handle rate transition for data transfer	
<input type="checkbox"/> Higher priority value indicates higher task priority	

Zero-crossing options	
Zero-crossing control:	Use local settings
Algorithm:	Nonadaptive
Time tolerance:	10*128*eps
Signal threshold:	auto
Number of consecutive zero crossings:	1000

Figura A. 1- Configuração dos Parâmetros da simulação

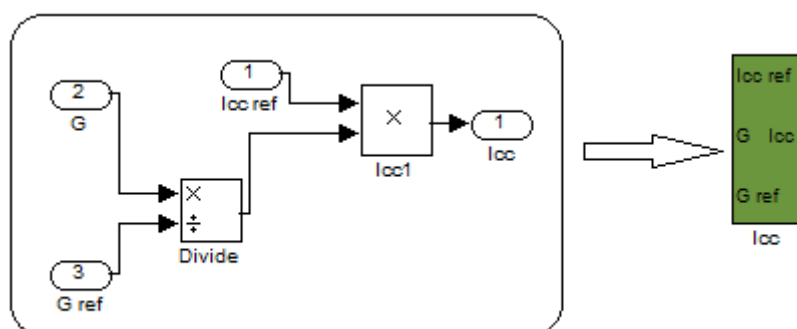


Figura A. 2- Subsistema do modelo modificado – Icc

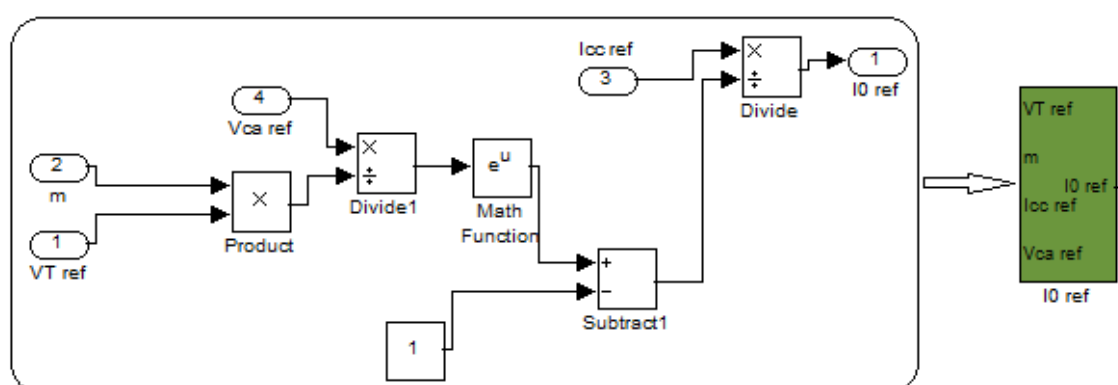


Figura A. 3 - Subsistema do modelo modificado - I0 de referência

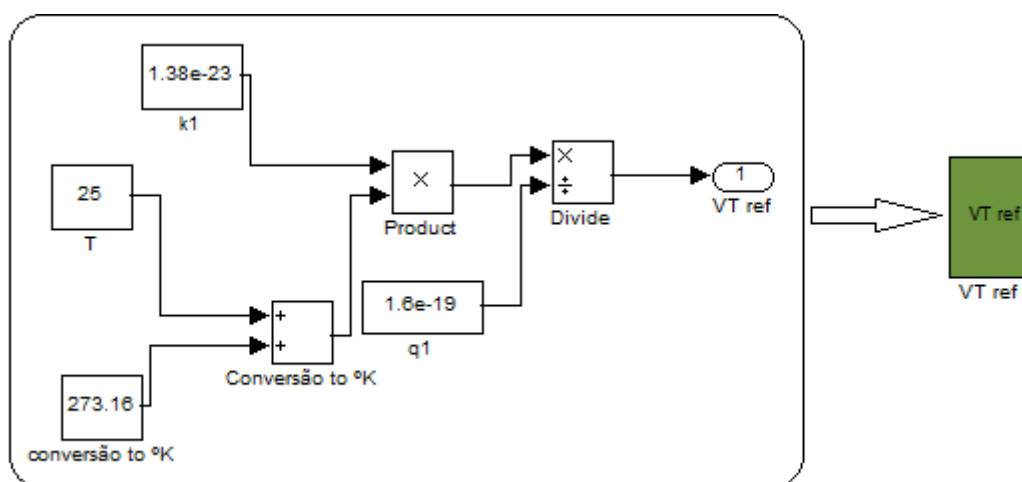


Figura A. 4 - Subsistema do modelo modificado - VT referência

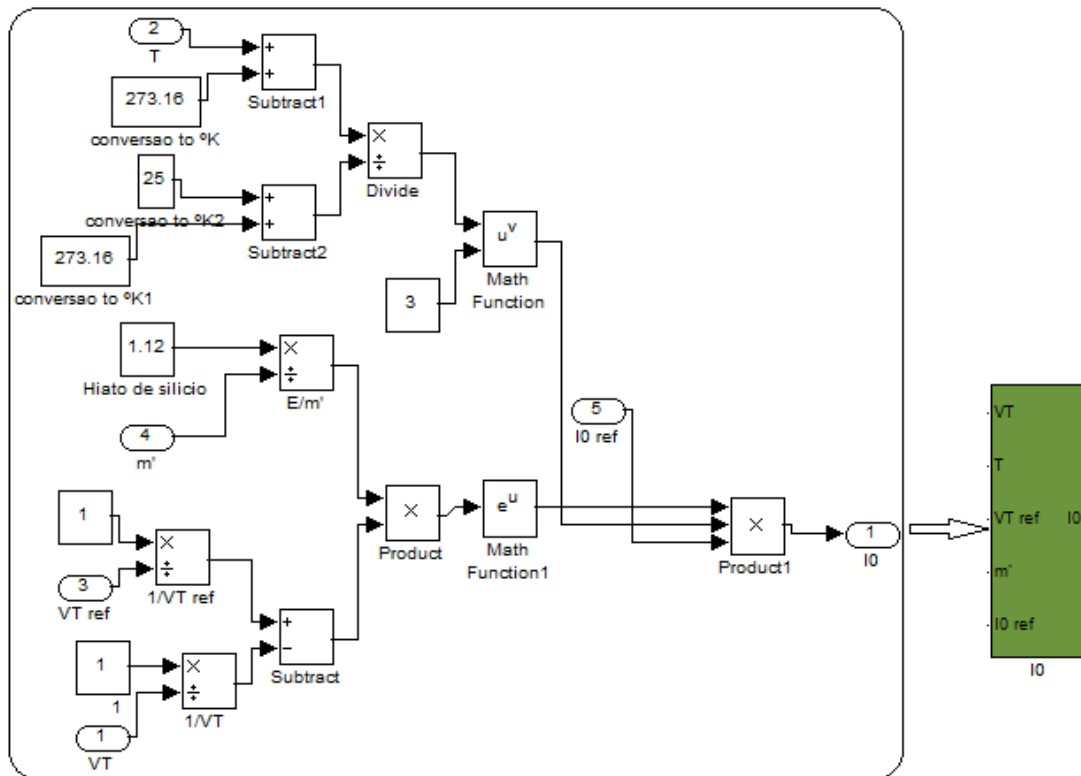


Figura A. 5 - Subsistema do modelo modificado - I_0

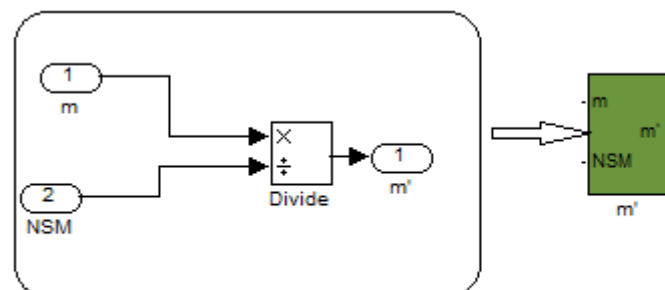


Figura A. 6 - Subsistema do modelo modificado - m'

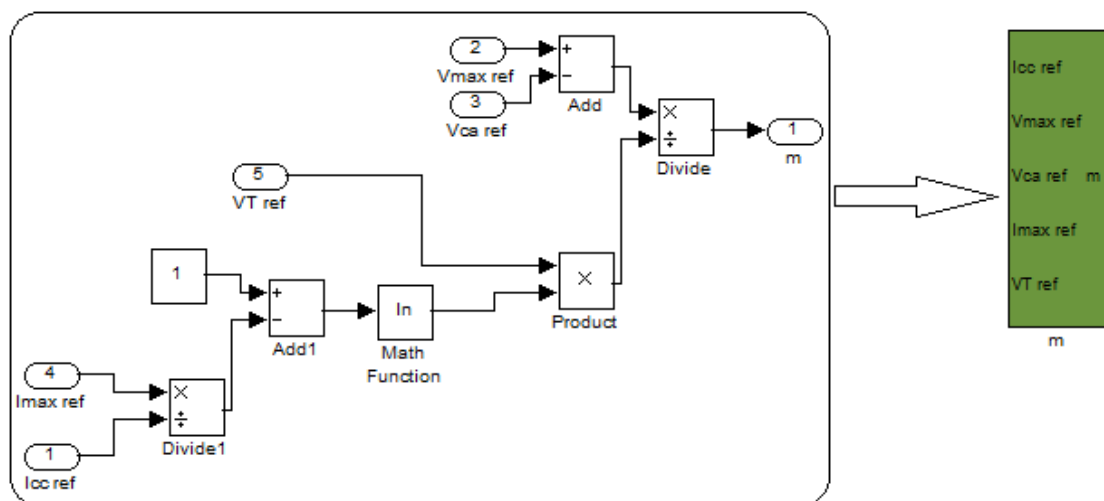


Figura A. 7 - Subsistema do modelo modificado – m

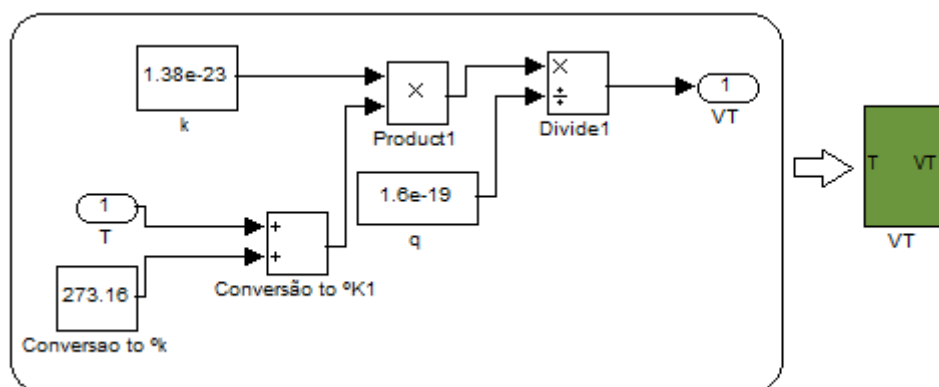


Figura A. 8 - Subsistema do modelo modificado – V_T

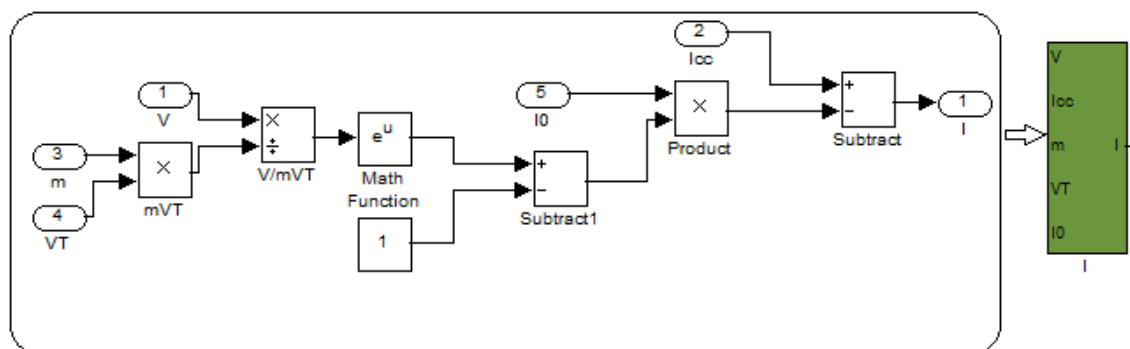


Figura A. 9 - Subsistema do modelo modificado - I

Anexo B – Montagem e instalação PV

Nesta secção são apresentados os dados obtidos experimentalmente dos módulos instalados. São apresentados dados da monitorização de períodos de 2011 e 2012.

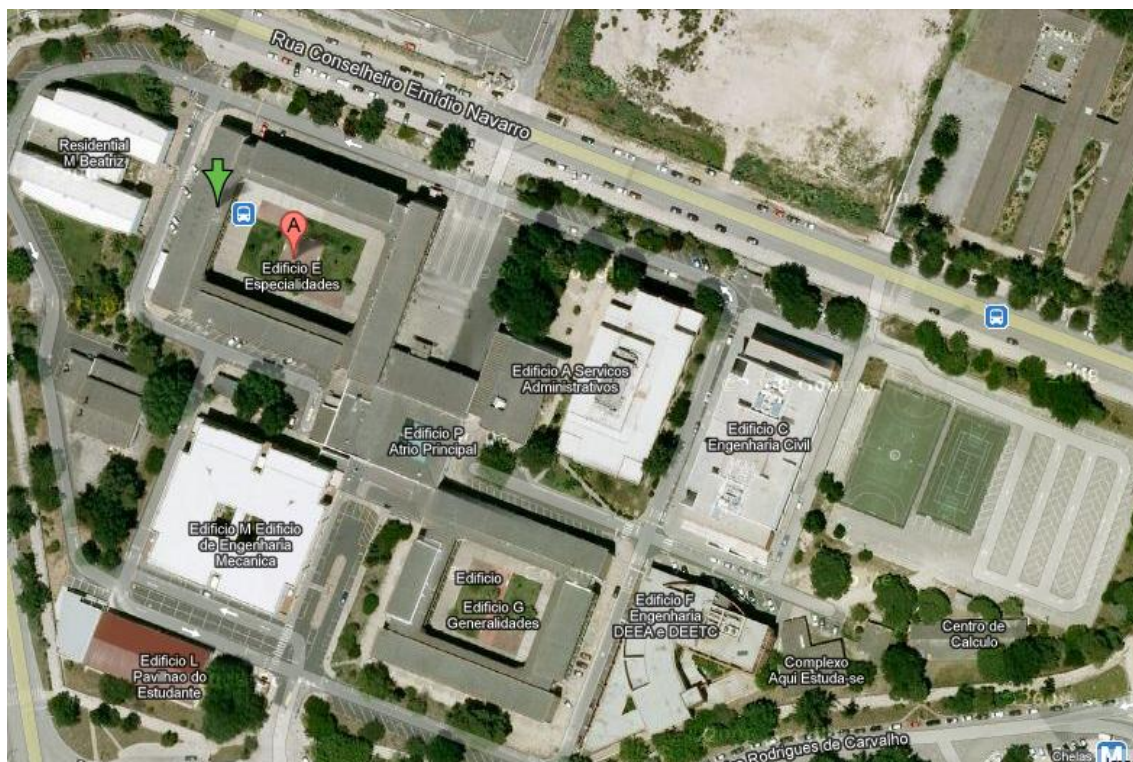


Figura B. 1 - Local da instalação (Google Maps)

Tabela B. 1 – Dados da energia captada dos módulos em 2011

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
Dias	E[wh]	E [Wh]	E [Wh]	E [Wh]	E [Wh]	E [Wh]	E [Wh]	E [Wh]
1	0	485	5689	5403	0	5427	2614	0
2	0	5377	10650	7741	0	10814	7288	0
3	0	9961	16235	11385	0	16062	8782	0
4	0	14141	20068	17139	1811	20430	14141	0
5	0	17359	22803	22289	7124	25804	19404	0
6	0	20681	26896	27242	10961	28270	24545	0
7	0	23950	29997	32287	16149	31721	29928	0
8	0	27219	30858	37695	20548	35412	35011	3630
9	0	27562	34990	41897	26193	36982	39041	8968
10	0	31163	39551	47788	31321	41139	44292	14116
11	0	31175	40911	53467	36655	46278	48215	19033
12	0	32240	43502	58968	41814	51573	52090	23996
13	0	33889	46380	64408	46883	55707	57558	29441
14	0	33964	47703	69679	51767	61104	62910	34454
15	0	37137	52700	75060	57209	66314	68179	39577

16	0	37416	57406	80272	61059	71572	73000	44862
17	0	40015	60809	85653	65559	76766	78177	50308
18	0	40016	66430	89594	65560	82193	83120	55747
19	0	40894	72151	91432	70975	87398	88802	59678
20	0	43539	77820	95596	76423	92320	94282	60466
21	29	47465	83419	99472	81827	97471	99924	64341
22	1826	49733	87807	101459	86870	102760	104376	66911
23	2625	54850	93449	105064	92005	108225	109772	72309
24	2625	60205	97259	110700	97125	113281	115025	77430
25	2793	65360	100599	116230	100601	118167	120246	82064
26	4542	70506	103660	121640	102221	122300	125413	87275
27	5478	75911	107463	126523	107243	126760	130548	92791
28	6741	81433	107463	131318	107522	131920	135640	98346
29	8817		111696	131318	111849	137296	140600	103512
30	11553		116178	131318	115113	142332	145593	108052
31	14466		121789		120800		150887	110279

Tabela B. 2 - Total de energia captada mensalmente – 2011

Meses	E [Wh]
31-1-11	14466
28-2-11	95899
31-3-11	217688
30-4-11	349006
31-5-11	469806
30-6-11	612138
31-7-11	763025
31-8-11	873304
30-9-11	963698
31-10-11	971048
30-11-11	1010130
31-12-11	1082895

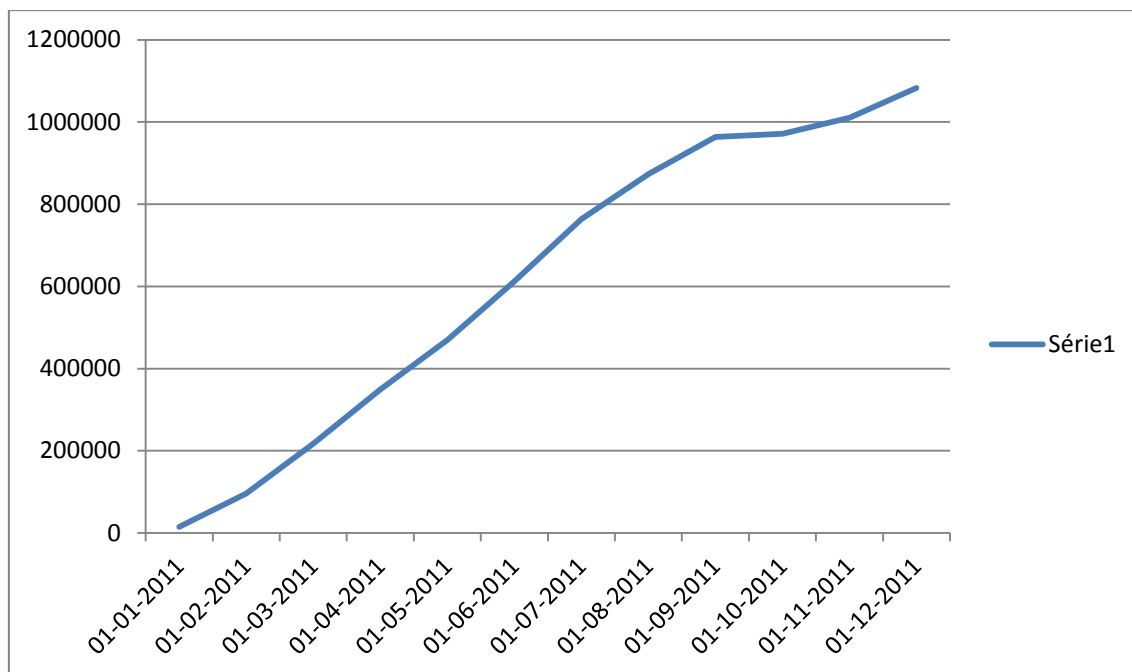


Figura B. 2 - Energia acumulada dos módulos instalados- 2011

Os dados referentes á monitorização do sistema PV instalado, durante os períodos de 2012 são apresentados em baixo.

Tabela B. 3 - Dados da energia captada dos módulos em 2012

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio
Dias	E [wh]	E [wh]	E [wh]	E [wh]	E [wh]
1	0	84175	229795	352445	448610
2	0	87041	232542	355553	453586
3	0	91628	235406	358902	455897
4	0	96864	238508	360444	455912
5	0	102314	241681	365128	460297
6	0	106682	247139	369528	464348
7	0	111651	251026	372168	469824
8	0	116999	256192	377413	470320
9	0	122196	261377	383266	473789
10	0	127464	267101	388850	478849
11	3746	132631	272347	390774	483902
12	7927	137790	277708	392693	485522
13	10138	143441	283005	395836	488361
14	12711	149045	288428	395854	491688
15	16300	154203	292690	398936	496973
16	17861	159642	292690	403808	502161
17	21598	165094	295000	409973	507157

18	26150	170379	297093	412718	511570
19	30843	175570	301818	414691	515263
20	35497	180689	307828	418220	519454
21	39356	186053	313849	420788	523422
22	44044	190850	319683	423571	527855
23	48548	196145	325246	426709	533021
24	51250	201522	329671	429420	538327
25	55197	206939	330828	432760	543393
26	58659	212037	335798	432788	548935
27	60216	217393	340752	435379	553922
28	64841	222027	342604	439811	558512
29	69491	224954	343930	439820	563869
30	74552		348064	443718	568501
31	79456		349851		573701

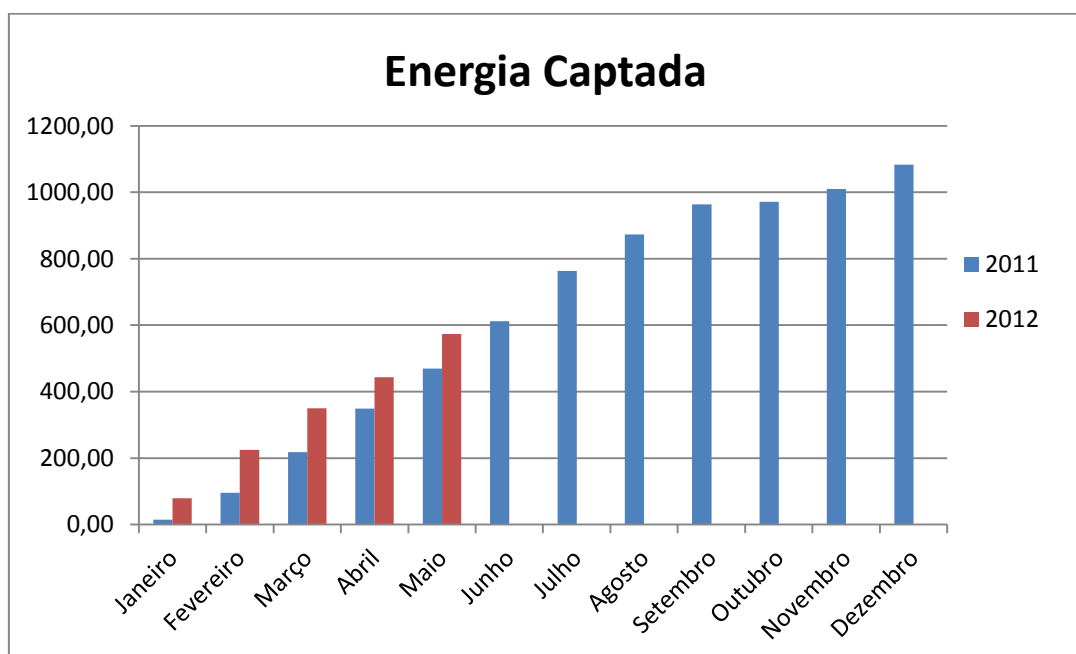


Figura B. 3 - Energia captada 2011/2012

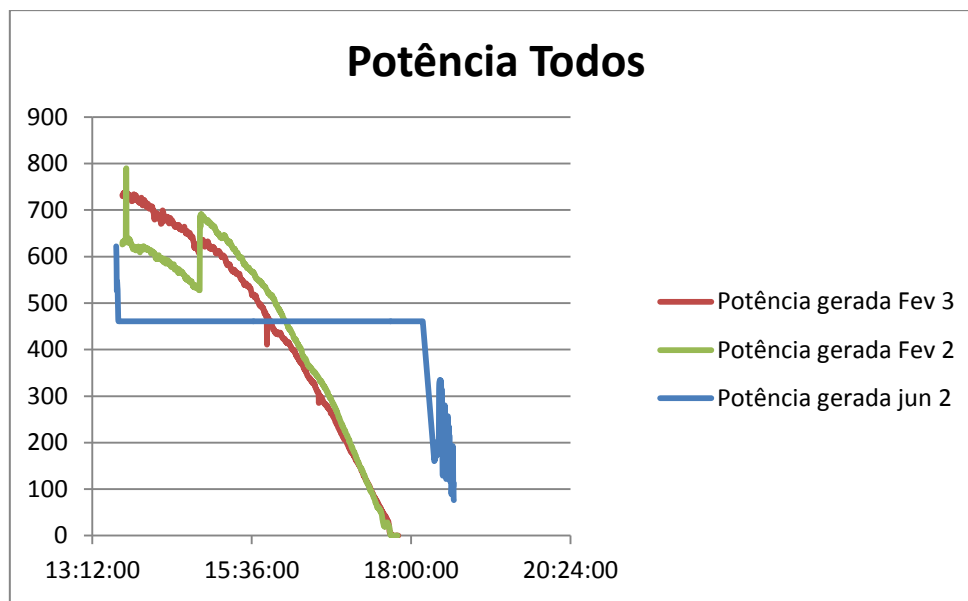


Figura B. 4 - Potência diária

Anexo C - Optimização das células PV

Nesta secção do anexo serão apresentados os valores experimentais recolhidos da corrente, tensão e potência, enquanto as células estavam expostas à radiação. Os cálculos realizados e os gráficos apresentados no capítulo 4, são resultados das médias dos vários ensaios realizados.

A Tabela que se segue é referente aos dados da simulação a uma das várias células que foram ensaiadas para o estudo em questão.

Tabela C. 1 - Simulação da célula solar (SPI-Sum Simulator 240A)

Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)
0	7,413465	0	0,491917	5,878428	2,891699
0,2187057	7,435873	1,626268	0,4937729	5,819415	2,873469
0,2464469	7,435397	1,83243	0,4957265	5,766594	2,858654
0,2742857	7,441179	2,041009	0,4983639	5,675926	2,828676
0,295287	7,415025	2,18956	0,5017826	5,56337	2,791602
0,3180464	7,431043	2,363416	0,5050061	5,448424	2,751488
0,3410012	7,395471	2,521864	0,5088156	5,295316	2,694339
0,3496948	7,382268	2,581541	0,5121368	5,16622	2,645811
0,3592674	7,373427	2,649032	0,5149695	5,044201	2,59761
0,3669841	7,37737	2,707378	0,5172161	4,933014	2,551435
0,3718681	7,356024	2,735471	0,5196582	4,828084	2,508953
0,3756777	7,359258	2,764709	0,5218071	4,735734	2,471139
0,3802686	7,343421	2,792472	0,5246398	4,598907	2,412769

0,3872039	7,323463	2,835674	0,5274725	4,475365	2,360632
0,3954091	7,308976	2,890035	0,5306959	4,338233	2,302283
0,4039072	7,277616	2,939482	0,5339195	4,176863	2,230109
0,4117216	7,232641	2,977834	0,5369475	4,017716	2,157302
0,4177778	7,222891	3,017564	0,5398778	3,877065	2,093141
0,4229549	7,17565	3,034976	0,5430037	3,715066	2,017295
0,4273505	7,135242	3,049249	0,5457387	3,572734	1,949779
0,4321368	7,090202	3,063937	0,5483761	3,426601	1,879066
0,4365324	7,060342	3,082068	0,5513064	3,272501	1,804151
0,441221	6,99576	3,086676	0,5540415	3,116105	1,726452
0,4443468	6,959696	3,092519	0,5567765	2,962182	1,649273
0,4464957	6,921625	3,090476	0,5593163	2,812144	1,572878
0,4483517	6,89313	3,090546	0,5620513	2,661074	1,49566
0,4510867	6,844292	3,087369	0,5649817	2,493529	1,408798
0,4538218	6,813556	3,09214	0,5679121	2,31855	1,316733
0,455873	6,775857	3,088931	0,5708424	2,137655	1,220264
0,4584127	6,730398	3,0853	0,5741636	1,932652	1,109658
0,4607571	6,690931	3,082894	0,577387	1,729333	0,9984946
0,4623199	6,654708	3,076604	0,5805128	1,52632	0,8860484
0,4648596	6,584414	3,060828	0,5837362	1,320336	0,7707278
0,4684738	6,495709	3,043069	0,586862	1,114047	0,6537919
0,4719903	6,424886	3,032484	0,5900855	0,9086348	0,5361722
0,475116	6,352282	3,018071	0,5931135	0,7004347	0,4154373
0,4795116	6,248284	2,996125	0,5961416	0,4969542	0,2962551
0,4827351	6,178485	2,982571	0,5985836	0,3172222	0,189884
0,4852747	6,102798	2,961533	0,6006349	0,1735886	0,1042634
0,4875214	6,02731	2,938442	0,6018071	0	0
0,4901587	5,941297	2,912179			

Anexo C.1 Sem arrefecimento

Tabela C. 2 - Valores I, V, P - Sem arrefecimento

Time	E_00	E_00	P_00	E_01	E_01	P_01	E_02	E_02	P_02	E_03	E_03	P_03	E_04	E_04	P_04	E_05	E_05	P_05	E_06	E_06	P_06
Geral	A	V	w	A	V	w	A	V	w	A	V	w	A	V	w	A	V	w	A	V	w
00:00	3,89	0,54	2,10	4,44	0,63	2,80	4,34	0,64	2,78	3,92	0,58	2,27	4,42	0,66	2,92	4,44	0,65	2,89	4,51	0,64	2,89
00:01	3,42	0,47	1,61	3,58	0,49	1,75	3,5	0,51	1,79	3,48	0,51	1,77	3,56	0,51	1,82	3,58	0,51	1,83	3,68	0,51	1,88
00:02	3,33	0,46	1,53	3,46	0,48	1,66	3,42	0,49	1,68	3,4	0,5	1,70	3,49	0,5	1,75	3,47	0,5	1,74	3,55	0,49	1,74
00:03	3,33	0,46	1,53	3,45	0,47	1,62	3,36	0,48	1,61	3,38	0,49	1,66	3,44	0,49	1,69	3,42	0,49	1,68	3,49	0,48	1,68
00:04	3,31	0,46	1,52	3,42	0,47	1,61	3,34	0,48	1,60	3,33	0,48	1,60	3,44	0,49	1,69	3,39	0,48	1,63	3,46	0,48	1,66
00:05	3,29	0,45	1,48	3,39	0,46	1,56	3,31	0,48	1,59	3,33	0,48	1,60	3,42	0,48	1,64	3,34	0,48	1,60	3,43	0,48	1,65
00:06	3,27	0,45	1,47	3,37	0,46	1,55	3,31	0,48	1,59	3,32	0,48	1,59	3,36	0,48	1,61	3,37	0,48	1,62	3,42	0,47	1,61
00:07	3,27	0,45	1,47	3,35	0,46	1,54	3,29	0,47	1,55	3,32	0,48	1,59	3,36	0,48	1,61	3,36	0,47	1,58	3,39	0,47	1,59
00:08	3,25	0,45	1,46	3,37	0,46	1,55	3,27	0,47	1,54	3,28	0,48	1,57	3,34	0,48	1,60	3,33	0,47	1,57	3,4	0,47	1,60
00:09	3,25	0,44	1,43	3,33	0,46	1,53	3,27	0,47	1,54	3,28	0,47	1,54	3,3	0,47	1,55	3,31	0,47	1,56	3,37	0,47	1,58
00:10	3,23	0,44	1,42	3,3	0,45	1,49	3,28	0,47	1,54	3,25	0,47	1,53	3,35	0,47	1,57	3,34	0,47	1,57	3,35	0,46	1,54
00:11	3,25	0,44	1,43	3,32	0,45	1,49	3,25	0,47	1,53	3,25	0,47	1,53	3,33	0,47	1,57	3,29	0,47	1,55	3,35	0,46	1,54
00:12	3,24	0,44	1,43	3,28	0,45	1,48	3,25	0,46	1,50	3,23	0,47	1,52	3,33	0,47	1,57	3,29	0,46	1,51	3,36	0,46	1,55
00:13	3,24	0,44	1,43	3,3	0,44	1,45	3,22	0,46	1,48	3,24	0,47	1,52	3,31	0,47	1,56	3,26	0,46	1,50	3,33	0,46	1,53
00:14	3,22	0,44	1,42	3,29	0,44	1,45	3,23	0,46	1,49	3,23	0,47	1,52	3,31	0,47	1,56	3,25	0,46	1,50	3,33	0,46	1,53
00:15	3,20	0,44	1,41	3,27	0,44	1,44	3,22	0,46	1,48	3,25	0,46	1,50	3,29	0,47	1,55	3,25	0,46	1,50	3,32	0,46	1,53
00:16	3,19	0,44	1,40	3,25	0,44	1,43	3,21	0,46	1,48	3,24	0,46	1,49	3,28	0,47	1,54	3,25	0,46	1,50	3,32	0,46	1,53
00:17	3,20	0,44	1,41	3,26	0,44	1,43	3,17	0,46	1,46	3,23	0,46	1,49	3,26	0,47	1,53	3,22	0,46	1,48	3,34	0,46	1,54
00:18	3,21	0,44	1,41	3,25	0,44	1,43	3,19	0,46	1,47	3,22	0,46	1,48	3,27	0,47	1,54	3,25	0,46	1,50	3,32	0,46	1,53
00:19	3,18	0,44	1,40	3,25	0,44	1,43	3,19	0,46	1,47	3,22	0,46	1,48	3,26	0,47	1,53	3,21	0,46	1,48	3,22	0,45	1,45

00:20	3,18	0,44	1,40	3,27	0,44	1,44	3,17	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,25	0,46	1,50	3,25	0,46	1,50	3,3	0,45	1,49
00:21	3,19	0,44	1,40	3,26	0,44	1,43	3,2	0,45	1,44	3,21	0,46	1,48	3,23	0,46	1,49	3,21	0,46	1,48	3,27	0,45	1,47
00:22	3,17	0,44	1,39	3,25	0,44	1,43	3,17	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,26	0,46	1,50	3,23	0,46	1,49	3,28	0,45	1,48
00:23	3,17	0,43	1,36	3,25	0,44	1,43	3,2	0,45	1,44	3,22	0,46	1,48	3,28	0,46	1,51	3,22	0,45	1,45	3,27	0,45	1,47
00:24	3,19	0,44	1,40	3,24	0,44	1,43	3,2	0,45	1,44	3,2	0,46	1,47	3,26	0,46	1,50	3,2	0,45	1,44	3,29	0,45	1,48
00:25	3,17	0,43	1,36	3,26	0,44	1,43	3,17	0,45	1,43	3,22	0,46	1,48	3,28	0,46	1,51	3,2	0,45	1,44	3,29	0,45	1,48
00:26	3,18	0,43	1,37	3,23	0,44	1,42	3,19	0,45	1,44	3,21	0,46	1,48	3,24	0,46	1,49	3,2	0,45	1,44	3,3	0,45	1,49
00:27	3,17	0,44	1,39	3,23	0,44	1,42	3,17	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,23	0,46	1,49	3,21	0,45	1,44	3,28	0,45	1,48
00:28	3,21	0,44	1,41	3,24	0,44	1,43	3,19	0,45	1,44	3,19	0,46	1,47	3,26	0,46	1,50	3,21	0,45	1,44	3,25	0,45	1,46
00:29	3,19	0,44	1,40	3,22	0,44	1,42	3,17	0,45	1,43	3,18	0,46	1,46	3,24	0,46	1,49	3,2	0,45	1,44	3,26	0,44	1,43
00:30	3,19	0,43	1,37	3,24	0,43	1,39	3,15	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,2	0,46	1,47	3,2	0,45	1,44	3,26	0,45	1,47
00:31	3,20	0,44	1,41	3,22	0,43	1,38	3,16	0,45	1,42	3,21	0,46	1,48	3,2	0,46	1,47	3,22	0,45	1,45	3,25	0,44	1,43
00:32	3,19	0,44	1,40	3,22	0,43	1,38	3,16	0,45	1,42	3,2	0,46	1,47	3,21	0,46	1,48	3,22	0,45	1,45	3,27	0,44	1,44
00:33	3,20	0,44	1,41	3,23	0,43	1,39	3,17	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,22	0,46	1,48	3,2	0,45	1,44	3,26	0,44	1,43
00:34	3,18	0,44	1,40	3,25	0,43	1,40	3,17	0,45	1,43	3,19	0,46	1,47	3,2	0,46	1,47	3,2	0,45	1,44	3,26	0,45	1,47
00:35	3,19	0,44	1,40	3,23	0,43	1,39	3,19	0,45	1,44	3,2	0,46	1,47	3,19	0,45	1,44	3,19	0,45	1,44	3,26	0,44	1,43
00:36	3,21	0,44	1,41	3,24	0,43	1,39	3,17	0,45	1,43	3,19	0,46	1,47	3,22	0,46	1,48	3,19	0,45	1,44	3,24	0,44	1,43
00:37	3,22	0,44	1,42	3,23	0,43	1,39	3,16	0,45	1,42	3,18	0,46	1,46	3,2	0,46	1,47	3,2	0,45	1,44	3,23	0,44	1,42
00:38	3,17	0,44	1,39	3,22	0,43	1,38	3,19	0,45	1,44	3,2	0,46	1,47	3,19	0,46	1,47	3,17	0,45	1,43	3,27	0,44	1,44
00:39	3,16	0,43	1,36	3,2	0,43	1,38	3,18	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,19	0,46	1,47	3,19	0,45	1,44	3,27	0,44	1,44
00:40	3,18	0,43	1,37	3,22	0,43	1,38	3,16	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,18	0,46	1,46	3,2	0,45	1,44	3,22	0,44	1,42
00:41	3,17	0,43	1,36	3,22	0,43	1,38	3,17	0,45	1,43	3,16	0,46	1,45	3,2	0,45	1,44	3,22	0,45	1,45	3,27	0,44	1,44
00:42	3,18	0,43	1,37	3,26	0,43	1,40	3,16	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,2	0,46	1,47	3,22	0,45	1,45	3,25	0,44	1,43
00:43	3,17	0,43	1,36	3,23	0,43	1,39	3,16	0,45	1,42	3,2	0,46	1,47	3,19	0,45	1,44	3,22	0,45	1,45	3,26	0,44	1,43
00:44	3,19	0,43	1,37	3,23	0,43	1,39	3,15	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,17	0,45	1,43	3,21	0,45	1,44	3,27	0,44	1,44
00:45	3,19	0,43	1,37	3,23	0,43	1,39	3,14	0,45	1,41	3,18	0,46	1,46	3,19	0,45	1,44	3,19	0,45	1,44	3,26	0,44	1,43
00:46	3,19	0,44	1,40	3,24	0,43	1,39	3,16	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,2	0,45	1,44	3,22	0,45	1,45	3,27	0,44	1,44

00:47	3,19	0,44	1,40	3,23	0,43	1,39	3,16	0,45	1,42	3,23	0,46	1,49	3,19	0,45	1,44	3,19	0,45	1,44	3,28	0,45	1,48
00:48	3,20	0,44	1,41	3,25	0,43	1,40	3,15	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,18	0,45	1,43	3,2	0,45	1,44	3,29	0,45	1,48
00:49	3,22	0,44	1,42	3,22	0,43	1,38	3,16	0,45	1,42	3,2	0,46	1,47	3,19	0,45	1,44	3,22	0,44	1,42	3,29	0,44	1,45
00:50	3,19	0,43	1,37	3,25	0,43	1,40	3,17	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,18	0,45	1,43	3,23	0,45	1,45	3,28	0,44	1,44
00:51	3,18	0,44	1,40	3,23	0,43	1,39	3,16	0,45	1,42	3,18	0,46	1,46	3,2	0,45	1,44	3,22	0,45	1,45	3,25	0,45	1,46
00:52	3,18	0,44	1,40	3,26	0,43	1,40	3,17	0,45	1,43	3,18	0,46	1,46	3,18	0,45	1,43	3,21	0,45	1,44	3,26	0,44	1,43
00:53	3,20	0,43	1,38	3,26	0,43	1,40	3,16	0,44	1,39	3,19	0,46	1,47	3,21	0,45	1,44	3,23	0,45	1,45			
00:54	3,20	0,43	1,38	3,22	0,43	1,38	3,15	0,45	1,42	3,17	0,46	1,46	3,2	0,45	1,44						
00:55	3,22	0,44	1,42	3,23	0,44	1,42	3,17	0,45	1,43	3,2	0,46	1,47	3,19	0,45	1,44						
00:56	3,20	0,43	1,38	3,24	0,43	1,39	3,16	0,45	1,42	3,19	0,46	1,47	3,17	0,45	1,43						
00:57	3,17	0,44	1,39	3,25	0,43	1,40				3,2	0,46	1,47	3,18	0,45	1,43						
00:58	3,21	0,44	1,41	3,24	0,43	1,39				3,17	0,46	1,46	3,17	0,45	1,43						
00:59	3,17	0,44	1,39	3,25	0,43	1,40				3,17	0,45	1,43	3,19	0,45	1,44						
01:00	3,23	0,43	1,39	3,22	0,43	1,38				3,19	0,46	1,47	3,16	0,45	1,42						
01:01	3,20	0,43	1,38	3,25	0,43	1,40				3,2	0,46	1,47									
01:02	3,17	0,43	1,36	3,25	0,43	1,40				3,21	0,46	1,48									
01:03	3,19	0,43	1,37	3,23	0,43	1,39															
01:04	3,19	0,43	1,37	3,26	0,43	1,40															
01:05	3,19	0,43	1,37	3,25	0,43	1,40															
01:06	3,17	0,43	1,36	3,25	0,43	1,40															
01:07	3,19	0,44	1,40	3,23	0,43	1,39															
01:08	3,19	0,44	1,40	3,23	0,43	1,39															
01:09	3,21	0,44	1,41	3,23	0,43	1,39															
01:10	3,17	0,43	1,36	3,25	0,43	1,40															
01:11				3,24	0,43	1,39															
01:12				3,25	0,43	1,40															

Enquanto as células estavam expostas à radiação fez-se a recolha dos valores da temperatura das células através da câmara térmica.

Tabela C. 3 - Temperatura das células

	E_00	E_01	E_02	E_03	E_04	E_05	E_06
Time	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
0:00	28,6	37,5	38	45,7	40,08	38	40,08
0:01	54,503	74,237	73,708	73,3085	70,3125	78,217	79,91
0:02	71,845	80,157	79,262	77,76	74,7715	84,714	86,881
0:03	76,069	82,453	82,424	81,335	77,3155	87,942	91,336
0:04	78,337	85,06	85,371	83,123	78,9375	90,712	94,601
0:05	80,151	87,565	87,009	84,508	80,6275	93,429	97,933
0:06	81,968	89,252	89,061	85,8595	82,1	95,63	100,663
0:07	83,513	90,717	90,852	87,105	82,8995	97,495	103,464
0:08	85,242	93,018	92,381	87,947	84,092	100,131	105,822
0:09	86,422	94,11	93,9	88,875	85,1355	102,184	107,837
0:10	87,393	95,147	95,38	89,633	84,669	103,641	109,906
0:11	88,354	96,635	96,071	90,5225	85,2545	105,137	111,788
0:12	88,984	97,685	97,484	91,2985	86,2785	106,156	113,325
0:13	90,518	98,65	99,102	92,1615	86,118	107,055	114,644
0:14	90,963	99,432	99,945	92,362	87,285	108,52	115,83
0:15	91,399	100,367	100,156	92,7405	87,571	109,008	116,554
0:16	91,785	100,702	101,133	93,0045	88,3365	109,94	117,189
0:17	92,907	101,258	101,533	93,397	88,0515	110,516	118,09
0:18	92,86	102,158	102,13	94,402	88,851	111,026	118,632
0:19	93,361	102,247	102,666	94,2625	89,1785	111,398	119,455
0:20	94,202	102,638	102,782	93,9185	89,6355	112,121	119,355
0:21	93,952	102,811	103,439	94,4215	90,1395	112,617	120,372
0:22	94,363	103,12	103,623	94,7165	89,887	113,18	120,668
0:23	94,497	103,456	103,426	94,9545	89,726	113,896	120,574
0:24	94,721	103,695	104,059	95,002	90,0745	114,214	121,512
0:25	94,545	103,689	104,544	95,318	89,92	114,447	121,65
0:26	94,769	104,251	104,327	95,4475	90,5375	114,976	121,754
0:27	95,532	104,237	104,262	95,4335	90,4455	115,009	121,659
0:28	95,456	103,72	103,758	95,723	91,4625	115,084	121,489
0:29	94,445	104,09	104,201	96,2935	92,248	115,057	122,177
0:30	95,303	104,682	104,281	96,157	93,0045	115,019	121,667
0:31	95,968	104,822	103,901	96,4425	92,604	115,057	122,27
0:32	94,395	104,76	104,749	96,44	93,283	115,451	122,272
0:33	95,263	104,774	104,475	97,077	93,5295	115,247	121,721
0:34	94,737	105,25	103,696	97,3065	93,3815	115,125	122,105
0:35	95,478	105,121	103,794	97,0345	93,614	115,37	122,13
0:36	96,651	104,935	104,241	97,0475	93,7035	115,477	121,829

0:37	95,434	105,458	104,619	97,1955	93,2515	115,54	122,346
0:38	96,076	105,772	104,96	97,313	93,893	116,066	122,267
0:39	96,184	106,065	104,849	96,9345	94,003	116,091	121,987
0:40	96,659	105,71	104,493	97,2125	93,7835	116,088	122,043
0:41	97,628	105,687	104,882	96,9795	94,5795	115,715	122,492
0:42	97,602	104,923	104,894	98,0855	94,033	115,595	122,386
0:43	97,055	105,306	105,636	97,3575	94,3795	115,711	121,914
0:44	96,703	105,602	104,491	97,4615	94,31	115,919	122,13
0:45	96,816	105,786	104,74	97,4195	94,5085	115,901	121,99
0:46	96,905	105,095	104,583	97,7585	94,073	115,901	122,025
0:47	96,728	105,286	105,389	97,6065	93,939	115,762	121,744
0:48	96,702	105,574	104,879	97,7265	94,257	115,902	121,19
0:49	97,203	105,471	104,94	97,774	94,612	116,349	121,622
0:50	97,305	105,561	104,663	97,857	94,501	115,178	121,757
0:51	98,224	105,819	104,687	98,376	94,2075	115,486	123,151
0:52	97,32	105,12	104,589	97,867	94,2635	115,496	--
0:53	97,031	105,696	104,653	98,3655	94,3995	--	
0:54	98,449	106,034	104,614	98,1645	94,539		
0:55	97,874	105,392	104,359	98,0445	94,408		
0:56	97,491	106,16	105,326	98,184	94,179		
0:57	97,864	105,903	104,719	98,513	94,5665		
0:58	97,377	106,383		98,6145	94,5775		
0:59	97,233	105,846		98,679	94,143		
1:00	97,392	105,979		98,2835	94,4755		
1:01	97,122	105,707		98,662			
1:02	96,951	105,705		98,597			
1:03	96,75	106,005					
1:04	97,015	106,055					
1:05	97,252	106,097					
1:06	96,854	105,998					
1:07	97,082	105,915					
1:08	96,782	106,293					
1:09	97,074	106,685					
1:10	96,942	105,861					
--	97,181	106,236					

Anexo C.2 Arrefecimento com água

Analogamente à secção anterior fez-se também a recolha dos dados da corrente, tensão e potência.

Tabela C. 4 - Valores I, V, P – Arrefecimento com água

E_01	E_01	E_01	E_01	E_03	E_03	E_03	E_05	E_05	E_05	E_04	E_04	E_04	E_06	E_06	E_06
hh:mm	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W
00:00	4,48	0,66	2,96	4,33	0,65	2,81	4,23	0,65	2,75	4,37	0,67	2,93	4,33	0,64	2,77
00:01	4,02	0,59	2,37	3,87	0,57	2,21	3,8	0,58	2,20	3,83	0,58	2,22	3,86	0,57	2,20
00:02	3,92	0,58	2,27	3,82	0,56	2,14	3,74	0,57	2,13	3,75	0,57	2,14	3,81	0,55	2,10
00:03	3,92	0,57	2,23	3,77	0,56	2,11	3,72	0,56	2,08	3,71	0,57	2,11	3,76	0,55	2,07
00:04	3,89	0,57	2,22	3,73	0,56	2,09	3,69	0,55	2,03	3,7	0,56	2,07	3,74	0,55	2,06
00:05	3,88	0,57	2,21	3,74	0,55	2,06	3,68	0,55	2,02	3,66	0,56	2,05	3,74	0,54	2,02
00:06	3,86	0,57	2,20	3,7	0,55	2,04	3,64	0,55	2,00	3,69	0,55	2,03	3,75	0,54	2,03
00:07	3,84	0,56	2,15	3,72	0,55	2,05	3,64	0,55	2,00	3,64	0,55	2,00	3,71	0,54	2,00
00:08	3,81	0,56	2,13	3,68	0,55	2,02	3,63	0,55	2,00	3,64	0,55	2,00	3,7	0,54	2,00
00:09	3,8	0,56	2,13	3,7	0,54	2,00	3,64	0,55	2,00	3,66	0,55	2,01	3,66	0,54	1,98
00:10	3,82	0,55	2,10	3,71	0,55	2,04	3,61	0,54	1,95	3,62	0,55	1,99	3,69	0,53	1,96
00:11	3,8	0,55	2,09	3,7	0,54	2,00	3,62	0,54	1,95	3,61	0,55	1,99	3,67	0,53	1,95
00:12	3,82	0,55	2,10	3,67	0,54	1,98	3,63	0,54	1,96	3,6	0,55	1,98	3,65	0,53	1,93
00:13	3,79	0,55	2,08	3,66	0,54	1,98	3,59	0,54	1,94	3,59	0,54	1,94	3,64	0,53	1,93
00:14	3,81	0,55	2,10	3,66	0,54	1,98	3,62	0,54	1,95	3,6	0,54	1,94	3,66	0,53	1,94
00:15	3,79	0,55	2,08	3,68	0,54	1,99	3,6	0,54	1,94	3,6	0,54	1,94	3,66	0,53	1,94
00:16	3,79	0,55	2,08	3,66	0,54	1,98	3,58	0,54	1,93	3,57	0,54	1,93	3,67	0,53	1,95
00:17	3,78	0,55	2,08	3,69	0,54	1,99	3,61	0,54	1,95	3,57	0,54	1,93	3,65	0,52	1,90

00:18	3,79	0,55	2,08	3,66	0,54	1,98	3,6	0,54	1,94	3,57	0,54	1,93	3,63	0,52	1,89
00:19	3,8	0,55	2,09	3,66	0,54	1,98	3,59	0,54	1,94	3,58	0,54	1,93	3,66	0,52	1,90
00:20	3,77	0,55	2,07	3,67	0,54	1,98	3,57	0,54	1,93	3,56	0,54	1,92	3,64	0,52	1,89
00:21	3,78	0,55	2,08	3,66	0,53	1,94	3,6	0,54	1,94	3,54	0,54	1,91	3,64	0,52	1,89
00:22	3,76	0,55	2,07	3,65	0,53	1,93	3,57	0,54	1,93	3,54	0,54	1,91	3,65	0,52	1,90
00:23	3,76	0,55	2,07	3,66	0,53	1,94	3,6	0,54	1,94	3,55	0,54	1,92	3,65	0,52	1,90
00:24	3,76	0,55	2,07	3,65	0,53	1,93	3,58	0,54	1,93	3,54	0,54	1,91	3,66	0,52	1,90
00:25	3,76	0,55	2,07	3,64	0,53	1,93	3,59	0,54	1,94	3,54	0,54	1,91	3,64	0,52	1,89
00:26	3,77	0,55	2,07	3,62	0,53	1,92	3,61	0,53	1,91	3,54	0,54	1,91	3,61	0,52	1,88
00:27	3,77	0,55	2,07	3,64	0,53	1,93	3,59	0,54	1,94	3,57	0,54	1,93	3,59	0,52	1,87
00:28	3,76	0,54	2,03	3,64	0,53	1,93	3,6	0,53	1,91	3,57	0,54	1,93	3,63	0,52	1,89
00:29	3,76	0,54	2,03	3,65	0,53	1,93	3,58	0,53	1,90	3,57	0,54	1,93	3,61	0,52	1,88
00:30	3,78	0,54	2,04	3,66	0,53	1,94	3,59	0,53	1,90	3,56	0,53	1,89	3,62	0,52	1,88
00:31	3,76	0,54	2,03	3,63	0,53	1,92	3,57	0,53	1,89	3,54	0,53	1,88	3,6	0,52	1,87
00:32	3,75	0,54	2,03	3,63	0,53	1,92	3,59	0,53	1,90	3,54	0,53	1,88	3,62	0,52	1,88
00:33	3,75	0,54	2,03	3,64	0,52	1,89	3,6	0,53	1,91	3,56	0,53	1,89	3,6	0,52	1,87
00:34	3,75	0,54	2,03	3,66	0,53	1,94	3,57	0,53	1,89	3,53	0,53	1,87	3,62	0,52	1,88
00:35	3,77	0,54	2,04	3,62	0,53	1,92	3,59	0,53	1,90	3,53	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:36	3,78	0,54	2,04	3,66	0,52	1,90	3,59	0,53	1,90	3,52	0,53	1,87	3,62	0,52	1,88
00:37	3,77	0,54	2,04	3,63	0,52	1,89	3,59	0,53	1,90	3,51	0,53	1,86	3,63	0,52	1,89
00:38	3,76	0,54	2,03	3,64	0,52	1,89	3,57	0,53	1,89	3,54	0,53	1,88	3,62	0,52	1,88
00:39	3,75	0,54	2,03	3,64	0,52	1,89	3,59	0,53	1,90	3,53	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:40	3,76	0,54	2,03	3,66	0,52	1,90	3,6	0,53	1,91	3,54	0,53	1,88	3,6	0,52	1,87
00:41	3,77	0,54	2,04	3,67	0,52	1,91	3,59	0,53	1,90	3,52	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:42	3,77	0,54	2,04	3,63	0,52	1,89	3,61	0,53	1,91	3,54	0,53	1,88	3,61	0,52	1,88
00:43	3,78	0,54	2,04	3,64	0,52	1,89	3,59	0,53	1,90	3,51	0,53	1,86	3,63	0,52	1,89
00:44	3,76	0,54	2,03	3,6	0,52	1,87	3,6	0,53	1,91	3,53	0,53	1,87	3,6	0,52	1,87

00:45	3,75	0,54	2,03	3,63	0,52	1,89	3,57	0,53	1,89	3,52	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:46	3,77	0,54	2,04	3,62	0,52	1,88	3,59	0,53	1,90	3,53	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:47	3,78	0,54	2,04	3,63	0,52	1,89	3,57	0,53	1,89	3,52	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:48	3,79	0,54	2,05	3,63	0,52	1,89	3,58	0,53	1,90	3,53	0,53	1,87	3,61	0,52	1,88
00:49	3,78	0,54	2,04	3,64	0,52	1,89	3,6	0,53	1,91	3,53	0,53	1,87	3,59	0,52	1,87
00:50	3,78	0,54	2,04	3,62	0,52	1,88	3,6	0,53	1,91	3,5	0,52	1,82	3,61	0,52	1,88
00:51	3,75	0,54	2,03	3,65	0,52	1,90	3,58	0,52	1,86	3,51	0,52	1,83	3,59	0,51	1,83
00:52	3,75	0,54	2,03	3,6	0,53	1,91	3,6	0,52	1,87	3,56	0,53	1,89	3,6	0,52	1,87
00:53	3,75	0,54	2,03	3,6	0,53	1,91	3,58	0,52	1,86	3,53	0,52	1,84	3,63	0,51	1,85
00:54	3,76	0,54	2,03	3,6	0,53	1,91	3,56	0,52	1,85	3,51	0,52	1,83	3,62	0,51	1,85
00:55	3,76	0,54	2,03	3,58	0,53	1,90	3,57	0,52	1,86	3,54	0,52	1,84	3,6	0,51	1,84
00:56	3,75	0,54	2,03	3,6	0,53	1,91	3,57	0,52	1,86	3,52	0,52	1,83	3,6	0,51	1,84
00:57	3,76	0,54	2,03	3,57	0,53	1,89	3,59	0,52	1,87	3,51	0,52	1,83	3,63	0,51	1,85
00:58	3,78	0,54	2,04	3,58	0,53	1,90			--	3,53	0,52	1,84	3,61	0,51	1,84
00:59	3,76	0,54	2,03	3,59	0,53	1,90			--	3,51	0,52	1,83	--		--
01:00	3,78	0,54	2,04	3,59	0,53	1,90			--	3,51	0,52	1,83	--		--
01:01	3,74	0,54	2,02	3,54	0,52	1,84			--	3,53	0,52	1,84			

Tabela C. 5 - Temperatura das células

Time	E_01	E_03	E_04	E_5	E_6
hh:mm	°C	°C	°C	°C	°C
00:00	43	37,8	35,1	40	40,4
00:01	61,281	57,838	35,097	58,329	59,797
00:02	67,258	62,981	56,178	63,62	66,306
00:03	72,272	67,271	62,025	67,914	71,562
00:04	77,12	71,064	66,788	71,927	76,2
00:05	81,363	74,424	70,816	75,437	80,679
00:06	85,663	77,588	74,437	78,284	84,595
00:07	88,693	80,262	77,441	81,053	87,616
00:08	91,553	82,904	80,508	83,326	90,57
00:09	94,062	85,156	83,115	85,992	93,151
00:10	96,613	87,061	85,628	87,988	95,354
00:11	98,782	88,847	87,463	89,589	97,045
00:12	100,385	90,201	89,124	90,975	98,778
00:13	101,761	91,575	91,055	92,364	100,213
00:14	102,852	92,647	92,242	93,679	101,508
00:15	103,662	93,353	93,295	94,923	102,71
00:16	104,886	94,505	94,592	95,581	103,598
00:17	105,622	95,122	95,39	96,125	104,272
00:18	106,321	95,733	96,146	96,764	105,089
00:19	107,135	96,468	97,013	97,345	105,558
00:20	107,542	96,835	97,556	97,797	106,14
00:21	108,114	97,25	98,026	98,335	106,55
00:22	108,17	97,406	98,37	98,447	106,841

00:23	108,303	97,731	98,911	98,659	107,169
00:24	108,501	98,135	99,097	98,995	107,699
00:25	108,81	98,22	99,262	99,161	107,85
00:26	109,003	98,685	99,638	99,412	108,041
00:27	108,986	98,739	99,702	99,567	108,313
00:28	109,431	98,935	99,955	99,577	108,531
00:29	109,396	99,064	100,309	100,02	108,796
00:30	109,37	99,017	100,507	100,204	108,896
00:31	109,593	99,373	100,687	100,173	109,02
00:32	109,565	99,159	100,901	100,165	108,936
00:33	109,346	99,665	100,988	100,254	109,076
00:34	109,473	99,551	101,1	100,382	109,181
00:35	109,765	99,741	101,104	100,43	109,227
00:36	110,012	99,776	101,399	100,394	109,357
00:37	110,023	99,742	101,382	100,398	109,456
00:38	110,343	99,932	101,334	100,459	109,476
00:39	110,408	100,179	101,396	100,682	109,439
00:40	110,02	99,903	101,577	100,73	109,467
00:41	109,964	100,138	101,686	100,953	109,424
00:42	110,697	100,127	101,6	100,76	109,583
00:43	110,893	100,344	101,547	100,769	109,488
00:44	110,792	100,652	102,122	101,007	109,523
00:45	110,543	100,686	102,114	101,048	109,554
00:46	110,511	100,746	101,817	100,923	109,551
00:47	110,669	100,737	102,183	100,824	110,024
00:48	110,94	100,745	102,025	100,839	109,977
00:49	110,882	100,609	102,084	101,006	110,184

00:50	110,896	100,476	102,236	101,194	110,043
00:51	110,928	100,829	102,36	101,316	110,056
00:52	109,745	100,739	102,373	101,34	110,345
00:53	109,997	100,762	102,543	101,337	110,462
00:54	110,108	101,051	102,55	101,474	110,459
00:55	109,993	101,12	102,735	101,533	110,518
00:56	110,099	101,391	102,622	101,495	110,581
00:57	109,935	101,349	102,702	101,558	110,695
00:58	110,064	101,434	102,593	101,799	110,583
00:59	110,095	101,497	102,762	101,889	110,697
01:00	110,127	101,504	102,872	102,001	

Tabela C. 6 - Temperatura da água

Time	E_01	E_03	E_04	E_5	E_6
hh:mm	°C	°C	°C	°C	°C
00:00	25	25,5	24,5	25	25,5
00:01	26	26	24,5	25	26
00:02	26	26	25	25,5	26
00:03	26	26	25	25,5	26
00:04	26	26	25	26	26
00:05	26	26,5	25	26	26,5
00:06	27	26,5	26	26	27
00:07	27	27	26	26	27
00:08	27	27	26	27	27

00:09	27	27	26	27	27
00:10	27,5	27	26	27	28
00:11	27,5	27,5	26,5	27	28
00:12	28	27,5	27	27,5	28
00:13	28	28	27	28	28
00:14	28	28	27	28	28
00:15	28	28,5	27	28	28
00:16	28,5	28,5	27	28	29
00:17	29	28,5	27,5	29	29
00:18	29	29	28	29	29
00:19	29	29	28	29	29
00:20	29	29	28	29	29
00:21	29,5	29	28	29,5	30
00:22	30	29,5	28,5	29,5	30
00:23	30	30	29	29,5	30
00:24	30	30	29	30	30
00:25	30	30	29	30	31
00:26	30,5	30	29,5	30,5	31
00:27	31	30	29,5	31	31
00:28	31	30,5	30	31	31
00:29	31	31	30	31	31
00:30	31	31	30	31	31,5
00:31	31	31	30	31	32
00:32	31	31	31	31,5	32
00:33	31	31,5	31	31,5	32
00:34	31,5	32	31	32	32
00:35	32	32	31	32	32

00:36	32	32	31	32	32
00:37	32	32	31,5	32	33
00:38	32	32,5	32	32	33
00:39	32	32,5	32	33	33
00:40	33	33	32	33	33
00:41	33	33	32	33	33
00:42	33	33	32	33	33,5
00:43	33	33,5	32,5	33	33,5
00:44	33	33,5	32,5	33	34
00:45	33,5	34	33	33,5	34
00:46	33,5	34	33	34	34
00:47	33,5	34	33	34	34
00:48	34	34	33	34	34
00:49	34	34	33	34	34,5
00:50	34	34	33,5	34	34,5
00:51	34	34	34	34,5	35
00:52	34	35	34	34,5	35
00:53	34,5	35	34	35	35
00:54	34,5	35	34	35	35
00:55	35	35	34,5	35	35
00:56	35	35	35	35	35
00:57	35	35	35	35	35,5
00:58	35	35	35		36
00:59	35	35,5	35		36
01:00	35	35,5	35		
01:01	35	36	35		

Anexo C.3 Arrefecimento com o cooler

Nesta secção são apresentados os valores da I,V,P dos ensaios em que as células enquanto expostas á luz dos expositores erram arrefecidas com um cooler.

Tabela C. 7 - Valores I, V, P dos ensaios realizados com o cooler

Time	E_00	E_00	P_00	E_01	E_01	P_01	E_02	E_02	P_02	E_03	E_03	P_03	E_04	E_04	P_04
hh:mm	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W
00:00	4,5	0,64	2,88	4,43	0,66	2,92	4,42	0,64	2,83	4,42	0,63	2,78	4,53	0,64	2,90
00:01	4,28	0,61	2,61	4,21	0,61	2,57	4,21	0,6	2,53	4,25	0,6	2,55	4,32	0,6	2,59
00:02	4,25	0,61	2,59	4,21	0,61	2,57	4,15	0,6	2,49	4,23	0,6	2,54	4,32	0,6	2,59
00:03	4,25	0,6	2,55	4,18	0,61	2,55	4,18	0,6	2,51	4,23	0,6	2,54	4,32	0,6	2,59
00:04	4,25	0,6	2,55	4,19	0,61	2,56	4,18	0,6	2,51	4,24	0,59	2,50	4,3	0,6	2,58
00:05	4,22	0,6	2,53	4,15	0,6	2,49	4,18	0,6	2,51	4,2	0,59	2,48	4,29	0,6	2,57
00:06	4,2	0,6	2,52	4,18	0,6	2,51	4,15	0,6	2,49	4,18	0,59	2,47	4,27	0,6	2,56
00:07	4,19	0,6	2,51	4,17	0,6	2,50	4,18	0,6	2,51	4,18	0,59	2,47	4,25	0,6	2,55
00:08	4,22	0,6	2,53	4,15	0,6	2,49	4,16	0,6	2,50	4,19	0,59	2,47	4,27	0,6	2,56
00:09	4,22	0,6	2,53	4,18	0,6	2,51	4,15	0,59	2,45	4,18	0,58	2,42	4,27	0,59	2,52
00:10	4,19	0,6	2,51	4,19	0,6	2,51	4,15	0,59	2,45	4,16	0,58	2,41	4,25	0,59	2,51
00:11	4,22	0,6	2,53	4,16	0,6	2,50	4,14	0,59	2,44	4,15	0,58	2,41	4,28	0,59	2,53
00:12	4,19	0,6	2,51	4,17	0,6	2,50	4,13	0,59	2,44	4,17	0,58	2,42	4,25	0,59	2,51
00:13	4,2	0,59	2,48	4,14	0,6	2,48	4,16	0,59	2,45	4,15	0,58	2,41	4,24	0,59	2,50
00:14	4,19	0,59	2,47	4,14	0,59	2,44	4,15	0,59	2,45	4,14	0,58	2,40	4,24	0,59	2,50
00:15	4,2	0,59	2,48	4,14	0,59	2,44	4,12	0,58	2,39	4,12	0,58	2,39	4,25	0,59	2,51
00:16	4,19	0,59	2,47	4,13	0,59	2,44	4,12	0,58	2,39	4,13	0,58	2,40	4,23	0,59	2,50
00:17	4,17	0,59	2,46	4,14	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,1	0,58	2,38	4,28	0,58	2,48

00:18	4,19	0,59	2,47	4,14	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,14	0,58	2,40	4,22	0,58	2,45
00:19	4,18	0,59	2,47	4,11	0,59	2,42	4,12	0,58	2,39	4,13	0,58	2,40	4,27	0,58	2,48
00:20	4,18	0,59	2,47	4,12	0,59	2,43	4,12	0,58	2,39	4,12	0,58	2,39	4,22	0,58	2,45
00:21	4,19	0,59	2,47	4,15	0,59	2,45	4,14	0,58	2,40	4,12	0,58	2,39	4,24	0,58	2,46
00:22	4,21	0,59	2,48	4,14	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,13	0,58	2,40	4,24	0,58	2,46
00:23	4,21	0,59	2,48	4,14	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,11	0,58	2,38	4,25	0,58	2,47
00:24	4,18	0,59	2,47	4,15	0,59	2,45	4,13	0,58	2,40	4,13	0,58	2,40	4,24	0,58	2,46
00:25	4,18	0,59	2,47	4,15	0,59	2,45	4,1	0,58	2,38	4,06	0,58	2,35	4,21	0,58	2,44
00:26	4,16	0,59	2,45	4,11	0,59	2,42	4,13	0,58	2,40	4,06	0,58	2,35	4,24	0,58	2,46
00:27	4,18	0,59	2,47	4,12	0,59	2,43	4,11	0,58	2,38	4,1	0,58	2,38	4,21	0,58	2,44
00:28	4,18	0,59	2,47	4,11	0,59	2,42	4,12	0,58	2,39	4,1	0,58	2,38	4,21	0,58	2,44
00:29	4,19	0,59	2,47	4,12	0,59	2,43	4,12	0,58	2,39	4,1	0,58	2,38	4,22	0,58	2,45
00:30	4,19	0,59	2,47	4,14	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,07	0,58	2,36	4,22	0,58	2,45
00:31	4,19	0,59	2,47	4,13	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,09	0,58	2,37	4,21	0,58	2,44
00:32	4,19	0,59	2,47	4,11	0,59	2,42	4,12	0,58	2,39	4,08	0,58	2,37	4,22	0,58	2,45
00:33	4,19	0,59	2,47	4,14	0,58	2,40	4,13	0,58	2,40	4,09	0,58	2,37	4,2	0,58	2,44
00:34	4,18	0,59	2,47	4,15	0,58	2,41	4,1	0,58	2,38	4,07	0,58	2,36	4,22	0,58	2,45
00:35	4,15	0,58	2,41	4,14	0,59	2,44	4,13	0,58	2,40	4,07	0,58	2,36	4,21	0,58	2,44
00:36	4,17	0,58	2,42	4,14	0,58	2,40	4,12	0,58	2,39	4,07	0,58	2,36	4,24	0,58	2,46
00:37	4,17	0,59	2,46	4,15	0,59	2,45	4,12	0,58	2,39	4,09	0,58	2,37	4,22	0,58	2,45
00:38	4,18	0,59	2,47	4,14	0,58	2,40	4,13	0,58	2,40	4,09	0,58	2,37	4,19	0,58	2,43
00:39	4,18	0,59	2,47	4,15	0,58	2,41	4,09	0,58	2,37	4,07	0,58	2,36	4,23	0,58	2,45
00:40	4,17	0,59	2,46	4,14	0,58	2,40	4,1	0,58	2,38	4,11	0,58	2,38	4,23	0,58	2,45
00:41	4,19	0,59	2,47	4,14	0,58	2,40	4,12	0,58	2,39	4,08	0,58	2,37	4,22	0,58	2,45
00:42	4,18	0,59	2,47	4,12	0,58	2,39	4,12	0,58	2,39	4,07	0,58	2,36	4,22	0,58	2,45
00:43	4,17	0,58	2,42	4,13	0,58	2,40	4,1	0,58	2,38	4,09	0,58	2,37	4,21	0,58	2,44
00:44	4,19	0,58	2,43	4,15	0,58	2,41	4,1	0,58	2,38				4,24	0,58	2,46
00:45	4,18	0,58	2,42	4,14	0,58	2,40	4,1	0,58	2,38				4,22	0,58	2,45

00:46	4,17	0,58	2,42	4,09	0,58	2,37	4,19	0,58	2,43
00:47	4,19	0,58	2,43	4,11	0,58	2,38	4,23	0,58	2,45
00:48	4,15	0,58	2,41	4,08	0,58	2,37	4,22	0,58	2,45
00:49	4,14	0,58	2,40	4,1	0,58	2,38	4,22	0,58	2,45
00:50	4,18	0,58	2,42	4,1	0,58	2,38	4,24	0,58	2,46
00:51	4,17	0,58	2,42	4,1	0,58	2,38	4,24	0,58	2,46
00:52	4,19	0,59	2,47	4,12	0,58	2,39	4,24	0,58	2,46
00:53	4,2	0,58	2,44	4,1	0,58	2,38	4,22	0,58	2,45
00:54	4,19	0,59	2,47	4,1	0,58	2,38	4,21	0,58	2,44
00:55	4,18	0,59	2,47	4,1	0,58	2,38	4,25	0,58	2,47
00:56	4,18	0,58	2,42	4,1	0,58	2,38	4,22	0,58	2,45
00:57	4,16	0,58	2,41	4,09	0,58	2,37	4,21	0,58	2,44
00:58	4,14	0,58	2,40	4,11	0,58	2,38	4,21	0,58	2,44
--			--	4,08	0,58	2,37	4,22	0,58	2,45

d

Tabela C. 8 - Temperatura das células

	E_00	E_02	E_04
hh:mm	°C	°C	°C
00:00	42,1	36,3	39
00:01	48,445	45,41	42,128
00:02	51,028	48,4	44,367
00:03	53,481	51,139	46,302
00:04	55,822	53,593	48,408
00:05	58,141	55,931	50,07
00:06	60,283	58,258	51,831
00:07	62,184	60,328	53,426
00:08	64,051	61,908	54,785
00:09	65,505	63,623	56,101
00:10	66,774	65,26	57,038
00:11	67,999	66,64	58,069
00:12	69,02	67,605	59,046
00:13	69,872	68,192	59,765
00:14	70,618	69,137	60,153
00:15	71,384	69,736	60,815
00:16	71,79	70,426	61,218
00:17	72,227	71,144	61,753
00:18	72,697	71,652	62,054
00:19	73,12	72,042	62,53
00:20	73,593	72,535	62,919
00:21	73,687	72,649	63,161
00:22	73,946	73,173	63,308
00:23	74,132	73,431	63,709
00:24	74,406	73,305	63,591
00:25	74,623	73,778	63,934
00:26	74,724	73,746	64,22
00:27	74,805	73,968	64,197
00:28	74,894	74,06	64,21
00:29	75,084	74,261	64,377
00:30	75,047	74,302	64,425
00:31	75,29	74,523	64,677
00:32	75,358	74,498	64,627
00:33	75,229	74,762	64,713
00:34	75,231	75,064	64,886
00:35	75,151	75,053	64,887
00:36	75,401	75,234	64,935
00:37	75,294	75,132	64,981
00:38	75,318	75,242	65,033

00:39	75,307	75,266	65,212
00:40	75,28	75,069	65,006
00:41	75,388	75,212	65,072
00:42	75,494	75,092	65,107
00:43	75,561	75,067	65,258
00:44	75,567	75,213	65,301
00:45	75,423	75,536	65,058
00:46	75,562	75,202	65,393
00:47	75,669	75,073	65,306
00:48	75,727	75,287	65,518
00:49	75,687	75,51	65,524
00:50	75,595	75,312	65,487
00:51	75,851	75,547	65,565
00:52	75,716	75,717	65,603
00:53	75,833	75,743	65,787
00:54	75,872	75,71	65,857
00:55	75,983	75,413	65,899
00:56	76,184	75,613	65,91
00:57	76,082	75,641	65,876
00:58	75,709	75,613	65,937
00:59		75,43	65,99
01:00		75,448	